

**Definizione, modellazione
teorico – sperimentale ed energy
management di sistemi termo –
fotovoltaici a concentrazione**

Fabio Petito



Unione Europea



*Ministero dell'Istruzione,
dell'Università e della Ricerca*



UNIVERSITÀ DEGLI
STUDI DI SALERNO

Department of Industrial Engineering

***Ph.D. Course in Industrial Engineering
(XV Cycle-New Series, XXIX Cycle)***

**Definizione, modellazione teorico –
sperimentale ed energy management di sistemi
termo – fotovoltaici a concentrazione**

Supervisor

Prof. Carlo Renno

Ph.D. student

Fabio Petito

Ph.D. Course Coordinator

Prof. Ernesto Reverchon

Ringraziamenti

Ringraziamenti

La conclusione del ciclo di dottorato in Ingegneria Industriale costituisce un importante traguardo che, come ogni percorso professionale, rappresenta il culmine di una sinergia lavorativa instauratasi durante il cammino. In questo senso, i miei ringraziamenti più sinceri vanno al mio tutor, il Prof. Carlo Renno, sia per la passione trasmessa nella ricerca che per il continuo sostegno a tutte le attività. Il suo ruolo di guida è risultato fondamentale per il completamento delle attività e mi ha permesso di crescere sia sul piano individuale che professionale.

Ringrazio inoltre, il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Salerno per l'opportunità offerta e per aver il sostegno ricevuto attraverso il personale e la struttura messe a disposizione, al fine di cooperare al meglio nelle attività di ricerca.

Infine voglio ringraziare la mia famiglia, i miei amici e tutte le persone a me care che mi hanno sostenuto in questi anni, offrendomi supporto e fiducia. Concludo con la speranza che questo traguardo possa rappresentare un ulteriore passo nella mia crescita professionale, che mi permetta di affrontare in maniera più consapevolezza il futuro che mi attende.

Pubblicazioni

Lista delle pubblicazioni

C. Renno, F. Petito. Design and modeling of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system for a domestic application. *Energy and Buildings*, 2013, 62:392 – 402.

C. Renno, F. Petito. Energy analysis of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system. *Energy Science and Technology*, 2013, 6:1 – 11.

C. Renno, F. Petito. Choice model for a modular configuration of a point-focus CPV/T system. *Energy and Buildings*, 2015, 92:55 – 66.

C. Renno, F. Petito, A. Gatto. Artificial neural network models for predicting the solar radiation as input of a concentrating photovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 2015, 106:999 – 1012.

C. Renno, S. Miranda, F. Petito. Inefficiencies analysis of a point-focus CPV/T system, *International Journal of Green Energy*, 2016, 13(9): 918 – 929.

G. De Feo, M. Forni, F. Petito, C. Renno. Life cycle assessment and economic analysis of a low concentrating photovoltaic system. *Environmental Technology*, 2016, 37(19):2473 – 2482.

C. Renno, F. Petito, A. Gatto. ANN model for predicting the direct normal irradiance and the global radiation for a solar application to a residential. *Journal of Cleaner production*, 2016, 135:1298 – 1316.

C. Renno, F. Petito. Experimental and theoretical model of a concentrating photovoltaic and thermal system. *Energy Conversion and Management*, 2016, 126:516 – 525.

C. Renno, F. Petito, G. Landi, H.C. Neitzert. Experimental characterization of a concentrating photovoltaic system varying the light concentration. *Energy Conversion and Management*, 2017, 138:119 – 130.

C. Renno, F. Petito, M.L. Accarino. Thermal comparison between the line and point-focus configurations of a concentrating photovoltaic system by means of an ANSYS model. 2017, Under Review.

Sommario

Sommario

Indice delle figure	IX
Indice delle tabelle	XV
Abstract	XVII
Introduzione	XXII

Capitolo 1: Il fotovoltaico a concentrazione: componenti e stato dell'arte

1.1. Introduzione	1
1.2. Fonti rinnovabili.....	3
1.3. L'energia solare.....	4
1.3.1. Parametri geometrici relativi alla posizione del Sole.....	6
1.3.2. Le componenti della radiazione solare.....	8
1.4. I sistemi a concentrazione	11
1.4.1. Analisi dei componenti di un sistema a concentrazione	14
1.4.2. Il fattore di concentrazione.....	16
1.4.3. L'angolo di accettazione	17
1.4.4. L'ottica di focalizzazione.....	19
1.4.4.1. Ottiche rifrattive	20
1.4.4.2. Ottiche riflesse	22
1.4.5. Il ricevitore solare	24
1.4.5.1. Configurazioni di un sistema a concentrazione.....	25
1.4.6. Sistemi di inseguimento	27
1.4.6.1. Classificazione dei dispositivi di puntamento	28
1.4.7. Classificazione ed esempi di sistemi a concentrazione	31
1.4.7.1. Sistemi a bassa concentrazione	32
1.4.7.2. Sistemi ad alta concentrazione	34
1.5. Analisi della letteratura sui sistemi a concentrazione	35
1.5.1. Principali studi di CPV e CPV/T	36
1.6. Conclusioni preliminari.....	38

Capitolo 2: Problematiche, strumenti di risoluzione e definizione delle fasi di lavoro

2.1. Introduzione	39
2.2. L'opportunità di cogenerazione.....	40
2.3. Problematiche nella modellazione dei sistemi a concentrazione..	41
2.4. La problematica dell'analisi di radiazione globale e diretta.....	44
2.4.1. La variabilità della radiazione	45
2.4.2. Metodo numerico per la valutazione della radiazione globale e diretta.....	46
2.5. Principi di funzionamento di una cella fotovoltaica.....	48
2.5.1 Modello a bande di energia	48
2.5.2. Effetto fotovoltaico e cella	49
2.5.3. Caratteristica di una cella fotovoltaica	51
2.5.4. La cella a tripla giunzione (MJ)	55
2.5.5. Problematiche legate alla cella ed alla sua temperatura	56
2.6. Le problematiche legate al livello di concentrazione	58
2.7. Problematiche legate all'ottica ed alla configurazione.....	59
2.8. Flow – chart del lavoro e strumenti di analisi	60

Capitolo 3: Modelli di reti neurali artificiali per la previsione della radiazione diretta e globale

3.1. Introduzione al problema	63
3.2. Generalità sui modelli per la previsione della radiazione solare ..	65
3.3. Descrizione e principali caratteristiche delle reti neurali artificiali	66
3.3.1. Principi generali	66
3.3.2. Breve storia delle reti neurali	68
3.3.3. Paradigmi di apprendimento	69
3.3.4. Funzioni di attivazione	74
3.3.5. Architettura di una rete neurale	76
3.3.6 Overfitting, early – stopping e crossvalidation.....	81

Sommario

3.3.7. Vantaggi e svantaggi delle reti neurali.....	82
3.4. Analisi della letteratura: modelli per la previsione del potenziale solare	83
3.4.1. Introduzione alla modellistica in letteratura per la previsione della radiazione globale e diretta.....	84
3.4.2. La previsione della radiazione solare basata su modelli alle reti neurali artificiali.....	85
3.4.3. Modelli ANN per la previsione della radiazione globale.....	86
3.4.3.1. Modello ANN con MLP e BP per la previsione della radiazione globale in regioni remote	88
3.4.3.2. Modello Gaussiano di previsione della radiazione globale giornaliera	92
3.4.3.3. Modello ANN feed – forward con BP per la previsione della radiazione globale a breve termine.....	96
3.4.3.4. Modello GRNN per la previsione della radiazione solare su superficie inclinata.....	99
3.4.4. Modelli ANN per la previsione della radiazione diretta	102
3.4.4.1. Modello di rete MLP-ARD per la stima della rilevanza di variabili radiometriche al fine della previsione della radiazione solare diretta.....	103
3.4.5. Schema riassuntivo dei principali contributi in letteratura per la previsione della radiazione globale e diretta tramite le ANN	107
3.5. Introduzione alla metodologia sviluppata	112
3.6. Metodologia adottata per lo sviluppo di modelli ANN per la previsione del potenziale solare per una determinata località.....	113
3.6.1. Flow – chart e punti salienti della modellazione per la definizione delle ANN	114
3.6.2. Scelta delle variabili di input.....	116
3.6.3. Raccolta dati.....	118
3.6.4. Pre e post – processing dei dati.....	118
3.6.5. Tipo di rete, configurazione topologica e validazione statistica	120
3.7. Modelli ANN sviluppati per la previsione della radiazione globale (GR) giornaliera e per la radiazione diretta (DNI) oraria.....	122
3.7.1. Implementazione del modello ANN per la previsione della radiazione globale giornaliera	124

3.7.2. Implementazione del modello ANN per la previsione della radiazione diretta oraria.....	128
---	-----

Capitolo 4: Modellazione teorica dei sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione

4.1. Introduzione	131
4.2. Concept preliminare per la modellazione di un sistema CPV/T	132
4.3. Definizione delle configurazioni adottate	134
4.3.1. Il set di ottiche e configurazioni	135
4.3.2. Scelte nel modello del sistema a concentrazione	137
4.4. Il modello teorico della cella in concentrazione.....	138
4.5. Modellazione della temperatura della cella.....	140
4.5.1. Letteratura sulla modellazione della temperatura della cella	141
4.5.1.1 Metodo IEC 60905-5.....	141
4.5.1.2 Metodo basato sulla resistenza termica	142
4.5.1.3 Modello ai coefficienti lineari	142
4.5.1.4 Reti neurali	143
4.5.1.5 Analisi comparativa dei metodi proposti.....	143
4.5.2. Modello teorico per la temperatura della cella.....	144
4.5.3. Principi per la modellazione teorico – sperimentale della temperatura della cella.....	146
4.5.3.1. Il data mining	147
4.5.3.2. Classification and Regression Tree (CART).....	148
4.5.3.3. Ensemble models – Random Forest	150
4.5.4. Modello teorico – sperimentale Random Forest e modelli di confronto	151
4.5.4.1. Costruzione e preparazione dei data set	152
4.5.4.2. Scelta degli input.....	155
4.5.4.3. Implementazione del modello Random Forest.....	156
4.5.4.4. Implementazione di modelli di confronto (regressione e reti neurali)	157
4.6. Modello elettrico del sistema a concentrazione.....	158

Sommario

4.7. Principi base per la modellazione termica di un sistema CPV/T	161
4.7.1. Modello preliminare del circuito di raffreddamento	162
4.7.2. Modello termico stazionario	165
4.8. Modellazione termica del sistema CPV/T in regime transitorio	167
4.8.1. Modello termico transitorio per un sistema point – focus	168
4.8.1.1. Modello termico	169
4.8.1.2. Risoluzione numerica	171
4.8.2. Modello termico transitorio generale e confronto: configurazioni point e line – focus	172
4.8.2.1. Definizione delle configurazioni analizzate	174
4.8.2.2. Modello termico transitorio equivalente	175
4.8.2.3. Soluzione numerica e condizioni al contorno	177
4.8.2.4. Confronti e simulazioni	179
4.9. Modello integrato	180
4.9.1. Possibili richieste energetiche dell'utenza	181
4.9.1.1. Richiesta di acqua calda sanitaria	182
4.9.1.2. Riscaldamento e refrigerazione	183
4.9.1.3. Fabbisogno elettrico	183
4.9.2. Eventuale serbatoio di accumulo	184
4.9.2.1. Dimensionamento e funzionamento del serbatoio	185
4.9.3. Modello di scelta	187
4.9.3.1. Modello di costo	188
4.9.4. Analisi aggiuntive per un impianto a concentrazione	189
4.9.4.1. Analisi di manutenzione	190
4.9.4.2. Impatto ambientale	191
4.10. Conclusione sui modelli	192

Capitolo 5: Analisi Sperimentale per la definizione e modellazione dei sistemi a concentrazione

5.1. Introduzione	193
5.2. Progettazione di un primo prototipo sperimentale	195
5.3. Realizzazione ed allestimento del prototipo sperimentale	197

Sommario

5.3.1. Le ottiche installate	198
5.3.2. La cella a tripla giunzione dell'impianto.....	199
5.3.3. Le modalità di inseguimento	201
5.3.4. Le configurazioni per l'analisi sperimentale	202
5.4. L'apparato di misura sperimentale	203
5.4.1. I sensori di temperatura	204
5.4.2. Sensori per la valutazione della radiazione	205
5.4.3. Il sistema di acquisizione dei dati.....	207
5.4.3.1. Connessione dei sensori al sistema di acquisizione	208
5.5. Le campagne sperimentali effettuate.....	209
5.5.1. Raccolta dati per la costruzione dei database	210
5.5.2. Prove sperimentali a concentrazione costante e variabile per la caratterizzazione in funzione della configurazione	211
5.6. Caratterizzazione sperimentale della cella in concentrazione	212
5.6.1. Procedura sperimentale per la caratterizzazione	213
5.6.2. Misure di elettroluminescenza.....	215
5.6.3. Procedura sperimentale per la valutazione del fattore di concentrazione.....	215
5.6.4. Monitoraggio sperimentale delle prestazioni del sistema ...	217
5.7. Progettazione di un secondo prototipo sperimentale di tipo line – focus	217
5.7.1. Definizione del fattore di concentrazione e progettazione ottica	219
5.7.2. Elementi per la movimentazione ed assieme definitivo	221

Capitolo 6: Risultati dell'analisi teorico – sperimentale

6.1. Introduzione	223
6.2. La previsione del potenziale solare incidente.....	224
6.2.1. Valutazione della radiazione diretta attraverso un metodo numerico.....	225
6.2.2. Previsione del potenziale solare attraverso modelli alle reti neurali.....	226

Sommario

6.2.2.1. Scelta della configurazione e risultati per la ANN per la previsione della radiazione globale	227
6.2.2.2. Scelta della configurazione e risultati per la ANN per la previsione della radiazione diretta.....	233
6.2.2.3. Confronto dei risultati ottenuti con la letteratura	238
6.3. Risultati preliminari della modellazione teorica	239
6.3.1. Risultati teorici del funzionamento della cella	240
6.3.2. Risultati del modello elettrico teorico	242
6.3.3. Risultati del modello termico teorico	244
6.3.4. Previsioni di producibilità attraverso le reti neurali	247
6.4. Risultati sperimentali	251
6.4.1. Caratterizzazione a concentrazione costante.....	252
6.4.2. Risultati principali della prima campagna sperimentale	254
6.4.2.1. Parametri in funzione del carico elettrico	254
6.4.2.2. Parametri in funzione della radiazione.....	255
6.4.2.3. Parametri in funzione della configurazione	256
6.4.2.4. Perdite per mancato inseguimento	257
6.4.3. Caratterizzazione della cella a concentrazione variabile.....	259
6.4.3.1. Parametri in funzione della concentrazione	260
6.4.4. Elettroluminescenza	264
6.4.5. Altri risultati della seconda campagna sperimentale.....	265
6.4.5.1. Monitoraggio delle prestazioni elettriche.....	265
6.4.5.2. Monitoraggio delle temperature	267
6.5. Risultati dei principali modelli teorico – sperimentali	268
6.5.1. Risultati del modello Random Forest per la T cella.....	268
6.5.1.1. Risultati statistici con Random Forest e confronto	273
6.5.2. Risultati dei modelli termici in regime transitorio	274
6.5.2.1. Risultati per il modello preliminare point – focus.....	274
6.5.2.2. Risultati del modello termico generale e confronto tra configurazioni line e point – focus	276
6.6. Applicazioni e modello integrato per la valutazione energetico – economica dei sistemi a concentrazione	284
6.6.1. Le richieste energetiche dell’utenza.....	285

Sommario

6.6.2. Possibile schema di connessione all'utenza	287
6.6.3. Esempi applicativi: modello di scelta e costi	289
6.6.4. Esempi applicativi: nuove stime di producibilità e confronti	291
6.6.5. Esempi applicativi: risultati elettrici di un sistema line – focus con batterie	292
6.6.6. Esempi applicativi: funzionamento del serbatoio.....	294
6.6.7. Il caso della manutenzione	296
6.6.8. Impatto ambientale.....	299
6.7. Conclusioni sui risultati.....	300
Conclusioni	301
Bibliografia	305
Lista dei simboli principali.....	315
Appendice	319

Indice delle figure

Capitolo 1: Il fotovoltaico a concentrazione: componenti e stato dell'arte

Figura I.1 <i>Spettro solare subito oltre l'atmosfera rispetto allo spettro di un corpo nero</i>	5
Figura I.2 <i>Posizione del Sole</i>	7
Figura I.3 <i>L'angolo di Zenit</i>	7
Figura I.4 <i>L'inclinazione dell'asse terrestre</i>	8
Figura I.5 <i>Andamento dell'air mass in funzione dell'angolo di Zenit</i>	10
Figura I.6 <i>Componenti della radiazione solare</i>	10
Figura I.7 <i>(a) schema di un concentratore, (b) esempio</i>	12
Figura I.8 <i>Cella solare MJ</i>	13
Figura I.9 <i>Fascio incidente sulla cella</i>	16
Figura I.10 <i>Angolo di accettazione</i>	18
Figura I.11 <i>Efficienza di concentrazione in funzione dell'angolo di accettazione</i>	19
Figura I.12 <i>Confronto tra una lente di Fresnel ed una lente sferica</i>	21
Figura I.13 <i>Lente singola</i>	21
Figura I.14 <i>Effetto dell'aberrazione cromatica sull'illuminazione di una cella</i>	22
Figura I.15 <i>Concentratore parabolico</i>	24
Figura I.16 <i>Esempio di configurazione point – focus</i>	26
Figura I.17 <i>Esempio di sistema line – focus con lente curva</i>	27
Figura I.18 <i>Esempio di sistema dense array</i>	27
Figura I.19 <i>(a) inseguitori di tilt; (b) inseguitori di rollio</i>	30
Figura I.20 <i>Esempio di moltiplicatore a specchi piani</i>	32
Figura I.21 <i>Esempio di concentratore termo – fotovoltaico</i>	34
Figura I.22 <i>Ottica a guida di luce</i>	34
Figura I.23 <i>Esempio di concentratore con micro specchi</i>	35

Capitolo 2: Problematiche, strumenti di risoluzione e definizione delle fasi di lavoro

Figura II.1 <i>Schema esemplificativo di un sistema cogenerativo per un'utenza domestica</i>	41
Figura II.2 <i>Principali problematiche e legami</i>	43
Figura II.3 <i>Eccitazione di un elettrone in un semiconduttore</i>	49
Figura II.4 <i>Giunzione p – n</i>	50
Figura II.5 <i>Funzionamento di una cella fotovoltaica</i>	51
Figura II.6 <i>Modello circuitale equivalente di una cella fotovoltaica</i>	51
Figura II.7 <i>Caratteristica I – V di una cella fotovoltaica</i>	53

Figura II.8 <i>Modello elettrico che tiene conto dei contributi resistivi</i>	54
Figura II.9 <i>Effetto della resistenza in serie e in parallelo</i>	54
Figura II.10 <i>Efficienza teorica in funzione del numero di giunzioni</i>	55
Figura II.11 <i>Effetto temperatura sulla curva caratteristica della cella</i> ..	57
Figura II.12 <i>Curva caratteristica I – V al variare dell'irraggiamento</i>	59
Figura II.13 <i>Fasi del lavoro con strumenti e problematiche</i>	62

Capitolo 3: Modelli di reti neurali artificiali per la previsione della radiazione diretta e globale

Figura III.1 <i>Principali modelli per la previsione della radiazione</i>	66
Figura III.2 <i>Schema concettuale di funzionamento di una rete neurale</i> ..	67
Figura III.3 <i>Logica dell'apprendimento supervisionato</i>	70
Figura III.4 <i>Logica dell'apprendimento non supervisionato</i>	70
Figura III.5 <i>Schema di un neurone che utilizza la delta rule</i>	71
Figura III.6 <i>Funzione di trasferimento a soglia</i>	74
Figura III.7 <i>Funzione di trasferimento lineare</i>	75
Figura III.8 <i>Funzione di attivazione sigmoide</i>	75
Figura III.9 <i>Funzione di attivazione tangente iperbolica</i>	75
Figura III.10 <i>Schema di una rete feed – forward multistrato</i>	76
Figura III.11 <i>Schema di una rete neurale stratificata</i>	77
Figura III.12 <i>Schema di una rete perceptron</i>	78
Figura III.13 <i>Perceptrone con soglia valutata come peso</i>	78
Figura III.14 <i>Schema di una MLP</i>	79
Figura III.15 <i>Regione individuabile con una MLP ad uno strato (a), due strati (b) e tre strati (c)</i>	80
Figura III.16 <i>Schema di una rete di Hopfield</i>	80
Figura III.17 <i>Curve di training e validazione in caso di overfitting con applicazione di early – stopping</i>	82
Figura III.18 <i>Schema della MLP configurata</i>	91
Figura III.19 <i>Condizioni meteorologiche e radiazione globale</i>	94
Figura III.20 <i>Scatterplot dei valori previsti</i>	95
Figura III.21 <i>Andamento della previsione giornaliera: (a) giornate nuvolose; (b) giornate soleggiate</i>	96
Figura III.22 <i>Andamento dell'errore durante la fase di training</i>	98
Figura III.23 <i>Dati raccolti per due distinte giornate</i>	99
Figura III.24 <i>Architettura della GRNN</i>	100
Figura III.25 <i>Rapidità del processo di addestramento della rete</i>	101
Figura III.26 <i>Topologia della rete sviluppata per il modello MLP</i>	104
Figura III.27 <i>Topologia di una rete MLP – ARD</i>	105
Figura III. 28 <i>Località target e stazioni di misura considerate</i>	114
Figura III.29 <i>Flow – chart della metodologia</i>	115
Figura III.30 <i>Schema di pre e post – processing</i>	120

Capitolo 4: Modellazione teorica dei sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione

Figura IV.1 Fasi di modellazione.....	134
Figura IV.2 Configurazione line – focus per un’ottica riflessiva.....	136
Figura IV.3 Configurazione point – focus per un’ottica riflessiva	137
Figura IV.4 Andamento dell’RMSE in funzione della temperatura	144
Figura IV.5 Esempio di albero di regressione per prevedere il carico elettrico	149
Figura IV.6 Schema logico del pretrattamento dei dati in KNIME	154
Figura IV.7 Implementazione del modello Random Forest	156
Figura IV.8 Costruzione del modello di regressione lineare	157
Figura IV.9 Implementazione della rete neurale	158
Figura IV.10 Flow – chart del modello elettrico	160
Figura IV.11 Schema base per lo scambio termico	162
Figura IV.12 Esempio di circuito di raffreddamento point – focus	165
Figura IV.13 Schema del modello stazionario	166
Figura IV.14 Circuito point – focus in Catia	169
Figura IV.15 Schema delle parti dello scambio termico.....	169
Figura IV.16 Modello delle resistenze termiche	170
Figura IV.17 Definizione dei domini computazionali	171
Figura IV.18 Schema del modello termico generale di confronto	173
Figura IV.19 Circuito point – focus del modello generale	174
Figura IV.20 Circuito line – focus del modello generale.....	174
Figura IV.21 Volumi di controllo per l’analisi termica	176
Figura IV.22 Domini per la configurazione point – focus	178
Figura IV.23 Domini per la configurazione line – focus	178
Figura IV.24 Fasi del modello integrato.....	181
Figura IV.25 Esempio di consumi per riscaldamento e raffreddamento	183
Figura IV.26 Schema di un serbatoio	185
Figura IV.27 Modello di scelta	188

Capitolo 5: Analisi Sperimentale per la definizione e modellazione dei sistemi a concentrazione

Figura V.1 Progetto preliminare del primo prototipo	196
Figura V.2 Gradi di libertà della struttura	196
Figura V.3 Dimensioni da progetto del sistema.....	197
Figura V.4 Il prototipo costruito all’Università di Salerno	197
Figura V.5 La lente di Fresnel installata	198
Figura V.6 Ottica secondaria costituita da un caleidoscopio.....	199
Figura V.7 Efficienza quantica delle giunzioni in funzione della lunghezza d’onda della radiazione incidente.....	200
Figura V.8 Cella a tripla giunzione impiegata	200

Figura V.9 Goniometro per l'inclinazione Nord – Sud e sistema inclinato	201
Figura V.10 Le configurazioni del prototipo per lo studio sperimentale	202
Figura V.11 (a) apparato di misura; (b) il tester FLUKE 233	204
Figura V.12 Termo – resistenze PT100 installate	205
Figura V.13 (a) Il piranometro LP PYRA 03; (b) risposta spettrale.....	206
Figura V.14 DataTaker DT80	207
Figura V.15 Collegamento dei sensori al DataLogger	208
Figura V.16 Esempio di misure di temperatura	211
Figura V.17 Esempio di misura della radiazione.....	211
Figura V.18 Schemi operativi per le fasi di caratterizzazione e funzionamento.....	214
Figura V.19 Progetto del prototipo sperimentale line – focus	218
Figura V.20 Schema per la progettazione ottica.....	220
Figura V.21 Concentrazione in funzione di troncatura e distanza focale	220
Figura V.22 Viste del concentratore progettato.....	221
Figura V.23 (a) supporto base; (b) motoriduttori ed albero; (c) elemento per la distanza focale; (d) supporto concentratore	222
Figura V.24 Progetto definitivo per il lancio in produzione	222

Capitolo 6: Risultati dell'analisi teorico – sperimentale

Figura VI.1 Fasi della presentazione dei risultati	224
Figura VI.2 Radiazione diretta mensile per varie città italiane.....	225
Figura VI.3 Radiazione diretta giornaliera media.....	226
Figura VI.4 Scatterplot di 4 configurazioni della rete neurale per la GR	229
Figura VI.5 (a) Schema della rete GNT2; (b) scatterplot del training .	230
Figura VI.6 Risultati del test della rete per la GR sulla stazione di Salerno.....	231
Figura VI.7 Risultati di test per 4 stazioni diverse: (a) Sessa Aurunca, (b) Montemarano, (c) Greci, (d) Policastro Bussentino	232
Figura VI.8 Scatterplot di 4 configurazioni della rete neurale per la DNI	235
Figura VI.9 (a) Schema della rete DNT5; (b) scatterplot del training .	235
Figura VI.10 Risultati del test della rete per la DNI sulla stazione di Salerno.....	236
Figura VI.11 DNI oraria in differenti condizioni climatiche tramite le DNT	237
Figura VI.12 Schema base per i modelli teorici.....	240
Figura VI.13 Andamento teorico della T cella in funzione di C	241
Figura VI.14 Rendimento teorico della cella in funzione di T cella e C	241

Indice delle figure

Figura VI.15 <i>Output elettrico annuale in funzione dell'ottica</i>	242
Figura VI.16 <i>Output elettrico per Salerno in funzione di C e numero celle</i>	243
Figura VI.17 <i>Energia elettrica annuale: (a) Nord Italia, (b) Sud Italia</i>	243
Figura VI.18 <i>Rendimento elettrico teorico del CPV/T</i>	244
Figura VI.19 <i>Output termico per Salerno in funzione di C e numero celle</i>	245
Figura VI.20 <i>Energia termica annuale: (a) Nord Italia, (b) Sud Italia</i>	246
Figura VI.21 <i>Potenza termica teorica giornaliera</i>	246
Figura VI.22 <i>Temperatura ideale di uscita del fluido in funzione di C</i>	247
Figura VI.23 <i>Temperatura teorica del fluido per una giornata estiva</i> .	247
Figura VI.24 <i>Energia giornaliera tramite ANN (a) elettrica; (b) termica</i>	248
Figura VI.25 <i>Potenza giornaliera invernale del CPV/T in funzione della nuvolosità (a) elettrica; (b) termica</i>	249
Figura VI.26 <i>Potenza giornaliera estiva del CPV/T in funzione della nuvolosità (a) elettrica; (b) termica</i>	250
Figura VI.27 <i>Variabilità media giornaliera della produzione di energia elettrica</i>	251
Figura VI.28 <i>Caratteristica I – V per la prima caratterizzazione</i>	253
Figura VI.29 <i>Caratteristica I – V per la configurazione 4</i>	253
Figura VI.30 <i>Tensione sperimentale in funzione del carico</i>	254
Figura VI.31 <i>Corrente sperimentale in funzione del carico</i>	255
Figura VI.32 <i>Temperatura sperimentale in funzione della radiazione</i> .	255
Figura VI.33 <i>Corrente in funzione della radiazione</i>	256
Figura VI.34 <i>Energia durante la prima campagna con le 4 configurazioni</i>	257
Figura VI.35 <i>Temperatura della cella in funzione della configurazione</i>	257
Figura VI.36 <i>Energia con tracker imperfetto</i>	258
Figura VI.37 <i>Riduzione percentuale per errato inseguimento</i>	258
Figura VI.38 <i>Fattore C del prototipo in funzione dell'altezza della lente</i>	259
Figura VI.39 <i>Caratteristica I – V del prototipo</i>	260
Figura VI.40 <i>Caratteristiche I – V in base alla concentrazione</i>	261
Figura VI.41 <i>Parametri in funzione di C (a) V^{oc}; (b) I_{sc}</i>	262
Figura VI.42 <i>Parametri della cella in funzione di C (a) FF; (b) η; (c) Resistenza serie; (d) Resistenza di shunt</i>	263
Figura VI.43 <i>Spettro di elettroluminescenza della cella polarizzata con una corrente (a) 20 mA; (b) 50mA</i>	264
Figura VI.44 <i>Potenza elettrica misurata (a) a 930 W/m^2; (b) a 710 W/m^2</i>	266
Figura VI.45 <i>Confronto del rendimento elettrico in varie condizioni</i> ..	266
Figura VI.46 <i>Energia elettrica in funzione di C</i>	267

Indice delle figure

Figura VI.47	<i>Temperatura della cella in diversi mesi</i>	268
Figura VI.48	<i>Parte di un albero del modello Random Forest</i>	269
Figura VI.49	<i>Scatterplot della fase di addestramento secondo logica OOBE</i>	270
Figura VI.50	<i>Risultati della fase di test</i>	271
Figura VI.51	<i>T cella in funzione degli input per le 3 configurazioni</i>	272
Figura VI.52	<i>T cella in funzione della concentrazione con Random Forest</i>	273
Figura VI.53	<i>Temperatura del fluido con il primo modello in base a valori sperimentali (a) estate; (b) inverno</i>	275
Figura VI.54	<i>Temperatura del fluido in base a T celle teoriche</i>	276
Figura VI.55	<i>T uscita del fluido (a) line – focus (b) point – focus</i>	277
Figura VI.56	<i>Condizioni di stazionarietà</i>	278
Figura VI.57	<i>Andamento qualitativo lungo il circuito (a) line; (b) point</i>	279
Figura VI.58	<i>T fluido in tre differenti punti del circuito (a) line; (b) point</i>	280
Figura VI.59	<i>T del fluido lungo il diametro per lo schema line – focus</i>	281
Figura VI.60	<i>T del fluido (Ansys) lungo il diametro (line – focus)</i>	281
Figura VI.61	<i>Analisi parametrica per lo schema line (a)isolante; (b)velocità</i>	282
Figura VI.62	<i>Funzionamento del circuito line con diversi set point</i>	283
Figura VI.63	<i>T fluido con temperature della cella sperimentali (estate)</i>	284
Figura VI.64	<i>Esempio di carichi giornalieri (a) elettrici; (b) termici per acqua calda sanitaria; (c) termici per riscaldamento; (d) frigoriferi</i>	286
Figura VI.65	<i>Carichi medi mensili per un'utenza al Sud Italia</i>	287
Figura VI.66	<i>Connessione generale dell'impianto all'utenza</i>	288
Figura VI.67	<i>Schema di connessione della parte termica (a) caso cogenerazione; (b) caso trigenerazione</i>	289
Figura VI.68	<i>Risultati del modello di scelta per un esempio applicativo</i>	290
Figura VI.69	<i>SPB dell'impianto con il modello di scelta</i>	290
Figura VI.70	<i>Esempio di energia termica prodotta e richiesta</i>	291
Figura VI.71	<i>Producibilità e consumi giornalieri in varie condizioni</i> ..	293
Figura VI.72	<i>Schema di connessione con accumulo</i>	293
Figura VI.73	<i>Consumi invernali per ACS e riscaldamento in l/h</i>	294
Figura VI.74	<i>Stratificazione nel serbatoio per ACS e riscaldamento</i> ...	295
Figura VI.75	<i>SPB nel caso della manutenzione</i>	298

Indice delle tabelle

Indice delle tabelle

Capitolo 1: Il fotovoltaico a concentrazione: componenti e stato dell'arte

Tabella I.1 *Classificazione in base alla concentrazione* 31

Capitolo 2: Problematiche, strumenti di risoluzione e definizione delle fasi di lavoro

Tabella II.1 *Percentuali di radiazione diretta e diffusa* 46

Capitolo 3: Modelli di reti neurali artificiali per la previsione della radiazione diretta e globale

Tabella III.1 *Risultati di differenti MLP* 90

Tabella III.2 *Valori dei parametri statistici per le diverse città* 91

Tabella III.3 *Stato delle condizioni meteorologiche* 93

Tabella III.4 *Valori dei paraetri statistici in funzione del numero di neuroni*..... 97

Tabella III.5 *Risultati statistici dei due modelli studiati* 98

Tabella III.6 *Quadro riassuntivo analisi della letteratura (architettura ANN)*..... 107

Tabella III.7 *Quadro riassuntivo analisi della letteratura (variabili ed obiettivi)*..... 109

Tabella III.8 *Quadro riassuntivo analisi della letteratura (Vantaggi e Svantaggi* 110

Tabella III.9 *Scelta dell'algoritmo di apprendimento*..... 121

Tabella III.10 *Analisi di correlazione per gli input del modello GR* 125

Tabella III.11 *Numero di input e nRMSE per il modello GR*..... 126

Tabella III.12 *Differenti configurazioni topologiche per la rete neurale GR*..... 127

Tabella III.13 *Analisi di correlazione per gli input del modello DNI*... 129

Tabella III.14 *Numero di input e nRMSE per il modello DNI* 129

Tabella III.15 *Differenti configurazioni topologiche per la rete neurale DNI*..... 130

Capitolo 4: Modellazione teorica dei sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione

Tabella IV.1 *Scelte del modello per un CPV/T*..... 137

Tabella IV.2 *Esempio di caratteristiche fornite dal costruttore* 139

Tabella IV.3 <i>Esempio di valori soglia per il riconoscimento degli outliers</i>	153
Tabella IV.4 <i>Esempio di dati pretrattati</i>	155
Tabella IV.5 <i>Valori di resistenza termica del primo modello</i>	172
Tabella IV.6 <i>Valori di resistenza termica per il modello generale</i>	179
Tabella IV.7 <i>Prospetto valori parametri</i>	182
Tabella IV.8 <i>Coefficienti per il fabbisogno di energia elettrica</i>	184

Capitolo 5: Analisi Sperimentale per la definizione e modellazione dei sistemi a concentrazione

Tabella V.1 <i>Valori di targa della cella da 1cm²</i>	201
Tabella V.2 <i>Caratteristiche del sistema</i>	214
Tabella V.3 <i>Risultati della progettazione ottica</i>	221

Capitolo 6: Risultati dell'analisi teorico – sperimentale

Tabella VI.1 <i>Risultati statistici e scelta per le configurazioni della rete neurale per la GR</i>	228
Tabella VI.2 <i>Risultati statistici e scelta per le configurazioni della rete neurale per la DNI</i>	233
Tabella VI.3 <i>Frazione diretta mensile della radiazione globale tramite i modelli ANN realizzati</i>	237
Tabella VI.4 <i>Confronto con la letteratura della rete per la GR giornaliera</i>	238
Tabella VI.5 <i>Confronto con la letteratura della rete per la DNI oraria</i>	239
Tabella VI.6 <i>Valori caratteristici prima caratterizzazione</i>	252
Tabella VI.7 <i>Risultati della seconda caratterizzazione</i>	260
Tabella VI.8 <i>Numero ottimale di alberi</i>	269
Tabella VI.9 <i>Risultati statistici e confronto con Random Forest</i>	274
Tabella VI.10 <i>Temperature massime a regime per le due configurazioni</i>	278
Tabella VI.11 <i>Confronto tra CPV/T e PV</i>	292
Tabella VI.12 <i>Esempio analisi FMECA (parte 1)</i>	296
Tabella VI.13 <i>Esempio analisi FMECA (parte 2)</i>	297
Tabella VI.14 <i>Danno energetico e costi di inefficienza</i>	298
Tabella VI.15 <i>Energia primaria ed emissioni evitate</i>	299

Abstract

Abstract

La continua evoluzione nel settore delle energie rinnovabili ha condotto alla ricerca di soluzioni che permettano l'ottenimento combinato di vettori energetici eterogenei. Tale tematica introduce molteplici piani di analisi, dalla definizione di nuovi sistemi, all'analisi dell'impatto ambientale fino alla resa economica complessiva, nel classico paradigma costi – benefici.

In quest'ottica, le Green Renewable Technologies ridefiniscono il concetto di soluzione innovativa, in quanto rappresentano una scelta basata su principi di eco – sostenibilità. Tale aspetto fornisce una spinta propulsiva, sia alla ricerca di base che a quella industriale. Il punto cardine dell'analisi è sintetizzabile attraverso due concetti basilari: la definizione di nuovi sistemi non ancora standardizzati e la produzione combinata di energia per il soddisfacimento di richieste differenti.

In questo discorso si innestano, trovando ampi margini di studio i sistemi a concentrazione solare. Tali dispositivi, infatti, risultano privi di standard affermati sia dal punto di vista della configurazione specifica di impianto, che per quanto concerne la componentistica di base. Inoltre, seppur studiati principalmente per la produzione di energia elettrica o termica, in maniera separata, essi presentano elevate potenzialità di producibilità combinata.

Nel lavoro presentato viene fornita un'analisi approfondita dei sistemi a concentrazione. Nello specifico, considerando sia la parte elettrica che quella termica e definendo le principali tecnologie a supporto, parliamo di sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione. In generale, il principio fondamentale di un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione è quello di focalizzare i raggi luminosi, per mezzo di dispositivi ottici di vario genere, su particolari celle solari, di tipo multi – giunzione, al fine di aumentare l'energia ottenuta e ridurre l'area del materiale fotovoltaico attivo. Con la concentrazione della luce solare, la temperatura delle celle aumenta ed è fondamentale un corretto raffreddamento, al fine di non inficiare sul rendimento elettrico. Attraverso uno smaltimento attivo del calore, tramite un fluido termo – vettore, è possibile ottenere contemporaneamente energia termica.

Lo scopo del lavoro è la definizione e modellazione teorico – sperimentale di tali apparati al fine di poterne valutare le prestazioni energetiche ed economiche. In particolar modo, non ci si è riferiti ad uno specifico impianto ma, attraverso le varie simulazioni, si è svolta un'analisi parametrica che permettesse di comprendere l'influenza di ciascuna variabile, interna o esterna, sul sistema. In tal senso, è stato possibile adattare il funzionamento dell'impianto con varie configurazioni e valutarne le potenzialità elettriche e termiche a seconda dell'applicazione.

Un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione è composto da tre parti principali, l'ottica che permette di focalizzare la luce, il ricevitore, dove sono alloggiare le celle multi – giunzione e che include il sistema di recupero del calore e l'inseguitore. Le celle scelte sono a tripla giunzione, in particolar

modo sono state analizzate sperimentalmente le caratteristiche di celle di fosforo di Indio – Gallio, arseniuro di Gallio e Germanio (InGaP/GaAs/Ge).

Il lavoro valuta i principali parametri di un impianto a concentrazione, tra cui il fattore di concentrazione che descrive di quanto venga amplificata la radiazione incidente sulla cella, l'angolo di accettazione che incide sull'inseguimento e sulla corretta focalizzazione e la configurazione. Quest'ultima descrive come le celle e le ottiche sono disposte le une rispetto alle altre. I sistemi a concentrazione sono descritti in ogni loro componente, evidenziando i punti di forza ed analizzando quanto presente in letteratura.

L'analisi definisce tutte le parti da modellare e gli strumenti da impiegare per raggiungere l'obiettivo di valutazione complessiva di tali impianti.

In questo senso, partendo dall'input, al fine di valutare le prestazioni dell'impianto in ogni condizione, è stata definita una procedura per la stima del potenziale solare attraverso le reti neurali. In particolare, dato che i sistemi a concentrazione operano solo con la componente diretta della radiazione, si è fatta particolare attenzione al modello di tale frazione della radiazione globale. Sono state definite due reti, una per la radiazione globale ed una per la diretta. Dopo un'attenta analisi delle variabili input ed un processo di ricombinazione, la prima rete è stata costruita considerando sette parametri di input tra cui: latitudine e longitudine ore di luce, declinazione solare. La rete per la radiazione diretta, invece, presenta quattro input principali tra cui la stessa radiazione globale e l'indice di chiarezza, che descrive le condizioni di nuvolosità. Tali modelli sono stati addestrati, validati e testati con dati per vari anni, impiegando misure di database nazionali e prove sperimentali. Le reti valutate statisticamente e confrontate con la letteratura hanno offerto ottimi risultati in termini di errore medio sulla predizione. Le reti neurali, così definite, hanno permesso, poi, di implementare un'app mobile per la valutazione del potenziale solare a Salerno.

Al fine valutare le prestazioni energetiche di un impianto a concentrazione, si sono definiti differenti modelli. In particolar modo, si è descritto come valutare la producibilità elettrica, a partire dalle prestazioni delle celle e dalle configurazioni scelte. Grande attenzione, inoltre, è stata posta sui modelli per la valutazione della temperatura della cella, variabile che influenza sia la parte elettrica che quella termica. Il culmine dell'analisi è stata la costruzione di un modello tipo Random Forest che ha permesso di prevedere la temperatura al variare della concentrazione, della temperatura ambiente e della radiazione incidente. Come per i modelli alle reti neurali, anche in questo caso è stato fondamentale l'impiego di dati sperimentali raccolti sul campo. Infine, la valutazione delle prestazioni termiche dell'impianto ha avuto come principale elemento di analisi la temperatura del fluido termo – vettore. A seconda di concentrazione e numero di celle sono stati definiti due circuiti di raffreddamento, uno basato su uno schema point – focus, l'altro su una configurazione line – focus. Sfruttando software

Abstract

grafici come Catia e SolidWorks e implementando l'analisi numerica in Ansys è stato possibile osservare i tempi di risposta di ciascun impianto e le temperature raggiunte dal fluido. In particolare si è impiegata una soluzione di acqua e glicole in un circuito con un diametro interno di 4.2 cm e celle a tripla giunzione da 1 cm. I modelli, principalmente in regime transitorio, hanno permesso di valutare la configurazione line – focus come più efficiente sia per i tempi di risposta che per le temperature raggiunte. Anche in questo caso, parte delle simulazioni hanno considerato come input ai modelli termici, temperature della cella valutate sperimentalmente. L'ultima fase modellistica, infine, ha analizzato la connessione del sistema a concentrazione ad un'utenza domestica, definendo il funzionamento di un possibile serbatoio che fungesse da accumulo per l'energia termica. Si sono, inoltre, svolte analisi di inefficienza a partire da una prestabilita configurazione e sono state analizzate le potenzialità energetico – economiche degli impianti a concentrazione, in varie condizioni.

L'analisi sperimentale, come detto, rappresenta un aspetto basilare del lavoro, essa infatti ha avuto un duplice ruolo, da un lato ha permesso di analizzare l'incidenza di alcuni fattori, non direttamente rilevabile teoricamente. Dall'altro lato, invece, ha consentito, tramite il sistema di misura allestito, di costruire un database di rilevazioni, fondamentali per differenti modelli come quello di Random Forest per la valutazione della temperatura della cella, oppure quelli alle reti neurali.

Lo studio sperimentale parte dallo sviluppo di un sistema a concentrazione realizzato all'Università degli Studi di Salerno. Tale sistema sfrutta una configurazione point – focus con una lente di Fresnel dal diametro di 30 cm, un caleidoscopio come ottica secondaria, ed una cella a tripla giunzione. Attraverso tale apparato sono state valutate differenti configurazioni al fine di definire una procedura sperimentale per la valutazione del fattore di concentrazione. In modo particolare, variando l'altezza della lente e valutando le tensioni di corto circuito della cella, è stato, di volta in volta, calcolato un fattore di concentrazione. Ciò ha permesso di caratterizzare sperimentalmente la cella al variare di C, osservando i principali parametri quali: tensione di circuito aperto, Fill Factor, rendimento, resistenza serie e resistenza di shunt. Si è ottenuta una concentrazione massima di 310x con un'altezza della lente di circa 24 cm.

La fase sperimentale ha, in parallelo, previsto la definizione di una strumentazione di misura che permettesse da un lato di monitorare le prestazioni dell'impianto e dall'altro di raccogliere misure utili ai modelli teorici. In modo particolare, sono state impiegate diverse termo – resistenze, un piranometro, un sistema di acquisizione per la raccolta dei dati dai sensori ed il monitoraggio dei segnali elettrici ed una Source Meter Unit per imporre una tensione variabile in sede di caratterizzazione della cella. L'ultima fase di studio sperimentale ha permesso di progettare un nuovo impianto di tipo

line – focus, con un fattore di concentrazione intorno ai 100x, lanciato il produzione a Novembre 2016.

I principali risultati della modellazione teorico – sperimentale, consequenziali allo studio dell'input e delle variabili del sistema, mostrano le analisi elettriche e termiche svolte, evidenziando le ottime potenzialità dei sistemi a concentrazione. In modo particolare, considerando un'applicazione domestica, tramite un modello di scelta si è giunti alla definizione di un sistema point – focus con 180 celle disposte in tre moduli ed un fattore di concentrazione elevato. In questa configurazione, il sistema risponde ai carichi dell'utenza, sfruttando sia la rete elettrica che il serbatoio di accumulo. Altri esempi di applicazioni, hanno mostrato l'analisi di un sistema line – focus, con circa 500 celle.

I risultati dell'analisi sperimentale, oltre ad un fattore C stimato in 310x, evidenziano una temperatura massima della cella che supera i 70°C. Ciò quindi ha reso possibile l'analisi parametrica della temperatura, tramite il modello di Random Forest, che evidenzia come, all'aumentare della concentrazione, il sistema possa essere impiegato sia per il riscaldamento invernale che per la refrigerazione estiva.

In generale, per un'utenza domestica situata al Sud Italia, il sistema a concentrazione permette una produzione di circa 3000 kWh elettrici annui e di 10000 – 13000 kWh termici. Considerando richieste medie, la possibilità di scambiare energia elettrica con la rete e l'impiego di un serbatoio con integrazione si può affermare che tali sistemi presentano ottime potenzialità per un'utenza domestica. Inoltre, è potuto osservare come le differenti configurazioni possano sopperire alle richieste, con un tempo medio di ritorno dell'investimento tra gli 8 e gli 11 anni, nel caso di inefficienze irrisolte.

Il lavoro presentato, quindi mostra le grandi potenzialità dei sistemi a concentrazione nell'ambito della produzione combinata di energia. L'analisi teorica e sperimentale si è incentrata sullo studio dell'influenza di ciascun parametro, caratteristico di tali tipi di impianti. I principali risultati sono connessi alla previsione dell'input, alla valutazione del funzionamento in termini sia elettrici che termici, ed allo studio sperimentale dei sistemi al fine di progettare e realizzare diversi prototipi.

In generale, quindi i sistemi a concentrazione rappresentano una soluzione alternativa interessante, che mostra elevata flessibilità nella configurazione e nella possibilità di continui sviluppi volti a definire uno standard.

Introduzione

Il settore delle energie rinnovabili rappresenta un campo in continua evoluzione e lo sfruttamento di fonti alternative di energia ha visto, negli ultimi anni, rivolgere l'attenzione dei ricercatori e del mercato nel suo complesso, verso lo studio di nuovi sistemi per l'ottenimento di vettori energetici eterogenei.

La tematica introdotta affonda le sue radici su molteplici problematiche tra di loro connesse. In primo luogo, lo sfruttamento di fonti rinnovabili gioca un ruolo strategico nella riduzione dell'inquinamento ambientale, dall'altro, la ricerca di soluzioni innovative va a confrontarsi, dal punto di vista economico, con quelli che sono i costi specifici di produzione delle fonti tradizionali. In questo senso, lo studio di nuovi sistemi nell'ambito della Green Economy deve, da un lato, garantire la scelta di soluzioni che presentino una certa validità sia dal punto di vista del funzionamento che dei rendimenti attesi, dall'altro, assicurare una resa economica complessiva soddisfacente nel classico paradigma costi – benefici.

In quest'ottica, le Green Renewable Technologies ridefiniscono il concetto di soluzione innovativa, in quanto rappresentano una scelta basata su principi di eco – sostenibilità. Tale aspetto ha fornito, negli ultimi tempi, una spinta propulsiva, in questo campo, sia alla ricerca di base che a quella industriale. In realtà, i due aspetti sono chiaramente collegati e la ricerca di soluzioni alternative si è tradotta in maggiori investimenti.

Il punto cardine della ricerca è sintetizzabile tramite due aspetti basilari: la definizione di nuovi sistemi non ancora standardizzati e la produzione combinata di energia per il soddisfacimento di richieste differenti.

In questo discorso trovano ampi margini di studio i sistemi a concentrazione solare. Tali dispositivi, infatti, risultano privi di standard affermati sia dal punto di vista della configurazione specifica di impianto, che per quanto concerne la componentistica di base. Inoltre, seppur studiati principalmente per la produzione di energia elettrica o termica, in maniera separata, essi presentano elevate potenzialità di producibilità combinata.

In base alle tematiche dibattute, lo studio di tali sistemi necessita della predisposizioni di un insieme variegato di strumenti di analisi, in modo da poterne apprezzare le potenzialità.

L'obiettivo dell'elaborato, pertanto, è rappresentato da un'analisi approfondita dei sistemi a concentrazione. Nello specifico, considerando sia la parte elettrica che quella termica e definendo le principali tecnologie a supporto, parliamo di sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione. In generale, il principio fondamentale di un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione è quello di focalizzare i raggi luminosi, per mezzo di dispositivi ottici di vario genere, su particolari celle solari, di tipo multi – giunzione, al fine di aumentare l'energia ottenuta e ridurre l'area del materiale fotovoltaico attivo. Con la concentrazione della luce solare, le

temperature delle celle aumentano ed è fondamentale un corretto raffreddamento, al fine di non inficiare sul rendimento elettrico. Attraverso uno smaltimento attivo del calore, tramite un fluido termo – vettore che raffreddi le celle, è possibile ottenere contemporaneamente energia termica.

Lo scopo del lavoro è la definizione e modellazione teorico – sperimentale di tali apparati al fine di poterne valutare le prestazioni energetiche ed economiche. Il punto di forza dello studio risiede proprio nella valutazione dei sistemi per mezzo di modelli teorici ed analisi sperimentali che, non solo permettono una prima progettazione e realizzazione degli impianti, ma consentono di valutare i principali parametri e la loro influenza, al fine di consentire una riconfigurazione rispetto alle prime ipotesi.

Le attività di ricerca sono suddivise in diverse fasi. In primo luogo si analizzano i sistemi a concentrazione, evidenziando i principali componenti e fattori che li descrivono. In secondo luogo si riportano le principali problematiche nella definizione e modellazione teorico – sperimentale di tali sistemi. In seguito si descrivono i principali modelli teorici impiegati e le fasi di attività sperimentale condotte. Infine si riportano le ultime fasi di attività progettuale ed i risultati utili alla validazione dei sistemi a concentrazione per differenti applicazioni.

L'analisi, dopo un attento studio della letteratura, presenta quindi la definizione di differenti configurazioni dei sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione, al fine di poter implementare modelli che permettano una valutazione al variare del maggior numero possibile di parametri. Infatti, solo tramite una stima di tutte le possibili riconfigurazioni del sistema e, quindi, dopo aver modellato teoricamente e sperimentalmente le varie alternative, è possibile giungere ad una valutazione oggettiva.

Lo studio considera, nella modellazione, tutti i fattori che incidono sull'analisi, a partire dall'input. In questo senso, la radiazione solare incidente diviene una delle prime problematiche da modellare al fine di fornire una valutazione completa dei sistemi a concentrazione. Tale fase vede l'impiego di particolari modelli come quelli alle reti neurali.

In seguito, una volta definiti i componenti ed i parametri, i modelli teorici principali sono incentrati sulla valutazione della producibilità elettrica e termica. Dal punto di vista elettrico, gioca un ruolo fondamentale la caratterizzazione delle celle solari impiegate e come esse rispondano lavorando sotto concentrazione. In questo senso, l'impiego di analisi sperimentali sulle celle ha lo scopo di rilevare tutti quei trend, non modellabili teoricamente. Dal punto di vista termico, è fondamentale, invece, comprendere come si intende recuperare il calore dal sistema e come le specifiche configurazioni incidano sull'energia termica ottenibile. In questo senso, i principali parametri di studio sono la temperatura delle celle solari, che funge da motore per la parte termica ed incide anche sulle prestazioni elettriche, ed il circuito di raffreddamento scelto.

Introduzione

La temperatura della cella costituisce, forse, la principale incognita del sistema. La sua valutazione avviene prima tramite modelli teorici, fino a giungere all'impiego di tecniche specifiche di data mining, come l'algoritmo Random Forest. La definizione del circuito di raffreddamento richiede sia un'analisi degli scambi termici, sia una corretta impostazione numerica del problema che una sua definizione impiantistica.

Le fasi di modellazione teorica sfruttano algoritmi che nella maggior parte dei casi necessitano di dati sperimentali. Pertanto, in tutto lo studio, si rileva un profondo intreccio tra le fasi teoriche e quelle sperimentali. In questo senso, la progettazione e la realizzazione di un impianto e la definizione di una stazione sperimentale, servono sia allo scopo di validare i modelli, sia alla costruzione di un database di misure, utile ai modelli stessi.

Il risultato finale è quello di valutare differenti configurazioni dei sistemi a concentrazione utili per molteplici applicazioni, nonché realizzare sperimentalmente tali impianti per validare le fasi modellistiche. In questo senso, proprio la realizzazione di un primo impianto permette di rilevare una serie di caratteristiche, fondamentali per la definizione finale dei sistemi a concentrazione. Lo studio, inoltre, impiega diversi software di supporto per l'attività modellistica. In particolare, software grafici come Catia e SolidWorks e programmi per la risoluzione numerica come Ansys.

L'elaborato è suddiviso in differenti sezioni, utili alla impostazione, modellazione e valutazione del problema. Nel Capitolo 1 si introducono i sistemi a concentrazione analizzando i principali componenti, le differenti configurazioni e quanto già presentato nella letteratura scientifica di maggiore interesse.

Nel Capitolo 2, si presentano le principali problematiche nella modellazione dei sistemi, evidenziando come siano interconnesse le une con le altre, e quali strumenti siano richiesti per la risoluzione.

Il Capitolo 3 si interessa dei modelli alle reti neurali, definendo le principali caratteristiche di tali algoritmi. Sono, inoltre, presentati due modelli, uno per la radiazione globale ed uno per la radiazione diretta, necessari per caratterizzare il potenziale solare di una specifica località. In particolare, si mostra il processo di definizione dell'input solare per le successive analisi dei sistemi a concentrazione.

Nel Capitolo 4 sono presentati tutti i modelli teorici definiti. In particolare l'attenzione è posta sui modelli per la valutazione dell'energia termica ed elettrica. Si analizza il modello Random Forest per la temperatura della cella e si implementa a seconda della configurazione, un modello di analisi termica in regime transitorio per la valutazione della temperatura del fluido termovettore che raffredda le celle.

Il Capitolo 5 mostra tutte le fasi dell'analisi sperimentale, dagli impianti progettati e realizzati, alla strumentazione impiegata fino alle prove effettuate. In questa fase vengono evidenziati sia gli aspetti progettuali sia il

modo in cui le misure permettano di implementare parte dei modelli teorici e fornire risposte in merito ad alcuni parametri fondamentali.

Nel Capitolo 6 sono presentati tutti i risultati della modellazione teorico – sperimentale. Si osservano, inoltre, differenti configurazioni di impianto a seconda delle applicazioni, fino ad arrivare alla definizione di un possibile schema di connessione per un'utenza domestica, includendo la valutazione del sistema in funzione di carichi predefiniti.

Capitolo 1: Il fotovoltaico a concentrazione: componenti e stato dell'arte

1.1. Introduzione

Lo sfruttamento di fonti rinnovabili per l'ottenimento di energia costituisce ormai una tematica consolidata all'interno del dibattito internazionale. Negli ultimi anni, infatti, l'interesse verso le cosiddette "renewable energy technologies" è cresciuto notevolmente come dimostrato dagli investimenti effettuati in questo settore. Sostanzialmente le concause di tale fenomeno sono da ricercarsi nelle maggiori difficoltà di reperimento delle fonti fossili e nell'accresciuta centralità che ha assunto il problema dell'inquinamento ambientale. L'ampliamento del settore rinnovabile ha pertanto reso possibile la sperimentazione di nuovi sistemi che, a differenza di quanto fatto in passato, provvedessero all'erogazione di vettori energetici eterogenei.

In questo senso, l'utilizzo di tecnologie combinate le quali consentano il soddisfacimento delle differenti richieste energetiche che si manifestano quotidianamente, rappresenta una delle tematiche principali quando si parla di fonti rinnovabili. Ai fini della pratica quotidiana, quindi, trovano maggior gradimento quei sistemi che riescono a fornire i diversi vettori energetici richiesti in maniera contemporanea.

Il settore dell'energia solare, per l'intrinseca multidimensionalità che presenta, diviene pertanto il campo principale in cui ricercare quelle applicazioni che consentano l'ottenimento dello scopo preposto. Infatti, da un lato il fotovoltaico e dall'altro il solare termico, costituiscono da sempre tecnologie in grado di sopperire, in parte, alle richieste dell'utenza media. Tuttavia la ricerca ha palesato, per tali sistemi, alcuni limiti inerenti la conversione dell'energia ed i rendimenti, al contempo però ha consentito il proliferare, di dispositivi eterogenei che presentano elevate prospettive per il futuro.

Le scelte di produzione e consumo energetico, in passato, sono state guidate essenzialmente da parametri qualitativi valutabili in termini di trasportabilità, disponibilità e trasformabilità, il che ha indotto a privilegiare l'uso prevalente di combustibili fossili quali fonti energetiche primarie. Ciò che invece si è a lungo trascurato è l'impatto ambientale, elemento difficile da valutare nei costi di produzione dell'energia, dovendo quantificare danni di natura immateriale come l'effetto serra, l'inquinamento, l'esaurimento delle scorte, le tensioni politiche e l'instabilità economica.

Come detto, le fonti energetiche rinnovabili stanno vivendo una stagione di grande sviluppo a livello mondiale, assumendo un peso sempre maggiore nella produzione di energia. Sviluppare una fonte energetica in grado di garantire una produzione che presenti un basso impatto ambientale e che nel contempo sia economicamente competitiva è una sfida scientifica e tecnologica sempre più interessante. L'impiego del Sole per la produzione di energia elettrica rappresenta, tra le diverse fonti rinnovabili, quella che segna il tasso di crescita più elevato negli ultimi anni.

La stragrande maggioranza delle tecnologie fotovoltaiche attualmente utilizzate sono basate sul silicio; di questa il 60% utilizzano il silicio monocristallino, il 25% il silicio policristallino e il 15% il silicio amorfo.

Per avere un'idea dell'espansione del mercato fotovoltaico (PV) basta osservare l'andamento della produzione di celle solari su scala globale. Negli ultimi dieci anni la capacità di produzione di celle, in gran parte al Silicio (Si), è cresciuta annualmente con una media superiore al 40%.

Il problema principale dello sfruttamento del PV per la produzione di energia elettrica su vasta scala risiede nella bassa densità dell'energia radiativa che investe il suolo terrestre. Per generare 1 GW di potenza elettrica usando celle solari al Si, stimando un'efficienza complessiva del processo di conversione del 10%, si dovrebbe avere un'area di apertura di 10^7 m^2 .

Uno dei possibili rimedi a questa elevata richiesta è rappresentato dalla tecnologia fotovoltaica a concentrazione (CPV – concentrating photovoltaic). Utilizzando superfici riflettive o rifrattive, la luce del sole viene concentrata e focalizzata su una cella solare (o su un array di celle) di dimensioni contenute. Questo permette di risparmiare grandi quantità di materiale, anche se vengono introdotte complessità al sistema come la richiesta di un meccanismo di inseguimento del sole e un sistema di raffreddamento delle celle.

Contestualmente, la necessità di raffreddare le celle solari diviene un'opportunità nell'ambito della cogenerazione. Infatti, progettando il sistema in maniera opportuna è possibile prelevare calore dalle celle per produrre energia termica. Tale concetto è alla base dei sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione (CPV/T).

In questo Capitolo, dopo un breve excursus sulle fonti rinnovabili ed in particolare sulla fonte solare, si analizzeranno nello specifico quelli che sono i sistemi a concentrazione. In particolare, dopo una breve introduzione sui

Capitolo 1

principi base di funzionamento di tale tipi di impianti, si descriveranno i principali componenti osservando i principali sistemi in commercio, focalizzando l'attenzione sull'assenza di uno standard riconosciuto per tali tipi di impianti. In questo senso, soprattutto nel passaggio da CPV a CPV/T si analizzeranno i principali risultati riportati in letteratura. In questo modo si costruiscono gli elementi di base per riconoscere i problemi da analizzare e le soluzioni da ricercare.

1.2. Fonti rinnovabili

Le fonti rinnovabili ricoprono un ruolo chiave nell'ambito dello sviluppo sostenibile. Una fonte rinnovabile è quella fonte di energia, derivante da particolari risorse naturali, che, per loro intrinseca caratteristica, si rigenerano almeno alla stessa velocità con cui vengono consumate. In questo senso, risultano non "esauribili" ed il loro utilizzo non pregiudica le stesse risorse naturali per le generazioni future.

Esse sono, dunque, forme di energia alternativa alle tradizionali fonti fossili. Le fonti rinnovabili e quelle alternative hanno la peculiarità di essere pulite ovvero di non immettere nell'atmosfera sostanze nocive e/o clima - alteranti, quali ad esempio la CO₂.

In effetti, l'insieme delle fonti rinnovabili e l'insieme delle fonti alternative non coincidono in quanto si definiscono alternative le fonti di energia diverse dai combustibili fossili. Ad esempio, l'energia nucleare è una fonte alternativa ma non è considerata rinnovabile in quanto basata sullo sfruttamento di riserve combustibili limitate di origine minerale.

Alla fonte nucleare si può attribuire la sostenibilità più che l'aspetto rinnovabile perché la produzione da nucleare non determina emissioni di CO₂. Anche fonti fossili come gas, petrolio e carbone, che si originano da fenomeni naturali di degradazione della biomassa, presentano elementi vicini al rinnovabile. Tuttavia il problema è che i loro cicli di rigenerazione non si misurano col calendario umano, bensì in ere geologiche.

Senza entrare nello specifico delle varie fonti rinnovabili, nella sezione successiva verrà analizzata la fonte solare, fornendo le principali peculiarità e caratteristiche. Proprio dall'analisi delle caratteristiche di tale fonte è possibile comprendere come progettare, dimensionare e valutare un sistema fotovoltaico a concentrazione. Infatti, dato che l'input di tali sistemi è proprio l'energia solare, vanno compresi i pregi e difetti.

Nel Capitolo 2, viste le peculiarità definite, si osserverà come una delle principali problematiche sia la possibilità di prevedere, con buona approssimazione tale fonte al fine di stimare il potenziale solare per lo sviluppo di un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione.

1.3. L'energia solare

L'energia solare è l'energia originata dalle reazioni nucleari che si verificano all'interno della massa solare. Essa viaggia tramite onde elettromagnetiche caratterizzate dalle frequenze dello spettro solare. L'energia solare che raggiunge la superficie terrestre rappresenta quasi la totalità dell'energia disponibile sulla terra. Oltre all'apporto diretto sotto forma di luce e calore, essa è all'origine della biomassa (fotosintesi), del ciclo dell'acqua, dei venti, delle correnti oceaniche e, sotto forma immagazzinata, delle riserve di gas, petrolio e carbone.

La radiazione solare rappresenta l'energia radiante emessa dal Sole nell'unità di tempo e di superficie, la sua misura all'esterno dell'atmosfera è detta costante solare in quanto il suo valore è pressoché costante nel tempo (1367 W/m^2). Il valore reale dell'irraggiamento extraterrestre varia di $\pm 3,3\%$ nel corso dell'anno a causa dell'orbita ellittica della terra.

La radiazione solare, come detto, non è concentrata su una sola frequenza, ma è distribuita su un ampio spettro di ampiezza non costante con la forma di una campana, come lo spettro tipico di un corpo nero.

Un corpo nero può essere considerato un sistema in grado di assorbire tutta la radiazione che lo investe. Il Sole può essere considerato un corpo nero, esso assorbe tutta la radiazione incidente senza rifletterla, ed allo stesso tempo, dato l'enorme spessore, sarà nulla la parte trasmessa. Pertanto per quantificare l'energia emessa si può far riferimento alla legge di Stefan – Boltzmann per il corpo nero:

$$I = \sigma T^4 \quad (\text{I.1})$$

dove:

- $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$ è la costante di Stefan-Boltzmann.
- $T = 5780 \text{ K}$ è la temperatura assoluta media della superficie solare.

Di conseguenza: $I = 6.33 \times 10^7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Però la radiazione che arriva sulla Terra è solo una minima parte di questa. Utilizzando la legge dell'irradiazione sferica, cioè moltiplicando il precedente valore per il rapporto al quadrato tra il raggio solare medio pari a circa $6.95 \times 10^8 \text{ m}$ e la distanza media Sole – Terra, circa $1.49 \times 10^{11} \text{ m}$, arriviamo alla misura media della radiazione solare dell'atmosfera terrestre, prima definita, pari a 1367 W/m^2 .

L'intensità alle varie frequenze della radiazione emessa dal corpo nero, detta spettro del corpo nero, non dipende dalla natura del corpo, ma è funzione, quindi, della sola temperatura. Dal grafico in Figura I.1, si osserva come lo spettro del corpo nero ben approssima lo spettro reale al di fuori dell'atmosfera terrestre. Quest'ultimo è ottenuto a partire dai valori pubblicati

Capitolo 1

dalla NREL (National Renewable Energy Laboratory, struttura del dipartimento dell'energia statunitense).

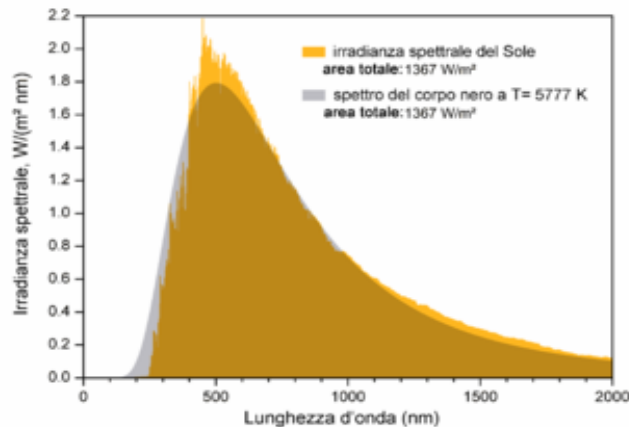


Figura I.1 Spettro solare subito oltre l'atmosfera rispetto allo spettro di un corpo nero

Circa il 45% dell'energia solare raggiunge la Terra nell'intervallo di lunghezze d'onda dello spettro visibile fra $0.3 \mu\text{m}$ e $0.7 \mu\text{m}$ dove raggiunge il suo valore massimo in corrispondenza di $\lambda=0.5 \mu\text{m}$, solo l'1% nell'intervallo di lunghezze d'onda più piccole (radiazione ultravioletta e X) e il restante 54% nello spettro infrarosso.

I principali vantaggi nello sfruttamento dell'energia solare sono:

1. L'energia solare è una fonte di energia rinnovabile e non esauribile; rinnovabile perché deriva dalla sfruttamento di risorse naturali e si rigenera almeno alla stessa velocità con cui viene consumata, non esauribile sempre disponibile.
2. Risulta essere la fonte energetica più abbondante in natura.
3. Lo sfruttamento dell'energia solare non produce inquinamento, scorie, o gas serra, l'impatto ambientale è limitato al riciclaggio delle componenti tecnologiche e dall'impatto paesaggistico negativo; perciò viene definita pulita.
4. L'energia solare è gratuita, è immediatamente disponibile sulla Terra senza sostenere alcun costo; ciò ha funzionato da spinta propulsiva verso l'autoconsumo.

Tuttavia alcuni svantaggi sono:

1. Scarsa densità energetica in quanto l'energia solare si distribuisce su tutto il pianeta ed è quindi necessario costruire impianti, per il suo sfruttamento, su vaste aree geografiche.

2. L'energia solare è discontinua, infatti, dipende dall'alternarsi del giorno e della notte, delle stagioni e fortemente influenzata anche dalle condizioni meteorologiche.
3. L'energia solare non è uniformemente distribuita ed è massima nelle zone equatoriali fino a toccare livelli minimi nelle zone polari, perciò l'energia solare non è sfruttabile ovunque e con la stessa intensità.

Le tecnologie, più diffuse, che sfruttano l'energia solare sono:

- Solare termico: conversione in energia termica mediante processi a bassa temperatura per il riscaldamento dell'acqua sanitaria e di ambienti, per applicazioni in processi industriali e per la produzione del freddo (solar cooling).
- Solare termodinamico (termico a concentrazione): conversione dell'energia solare in energia termica ad alta temperatura che alimenta un turboalternatore per la produzione di energia elettrica.
- Fotovoltaico: conversione diretta dell'energia raggiante in energia elettrica ottenuta tramite lo sfruttamento delle proprietà di alcuni materiali semiconduttori (effetto fotovoltaico).

1.3.1. Parametri geometrici relativi alla posizione del Sole

Il percorso del Sole sulla volta celeste, per un osservatore che si trovi sulla Terra, assume la forma di un arco variabile in funzione del periodo dell'anno e della latitudine del luogo. Durante il corso dell'anno la durata delle ore di luce ed il percorso del Sole subiscono delle modifiche al variare delle stagioni. La posizione del Sole rispetto ad un punto sulla Terra è determinata dall'angolo di **altezza solare α** e dall'**angolo azimutale γ** . L'angolo di altezza solare o distanza del Sole sull'orizzonte α è l'angolo verticale che la retta tracciata dall'osservatore al Sole forma con il piano orizzontale, γ rappresenta, invece, l'angolo orizzontale tra il piano verticale passante per il Sole e la direzione Sud, positivo verso Est e negativo verso Ovest, come riportato in Figura I.2.

Un altro riferimento importante è costituito dallo Zenit, infatti mentre l'altezza o elevazione solare costituisce l'angolo tra l'orizzonte ed il raggio solare incidente sulla Terra, il suo complementare, **l'angolo di Zenit θ_z** , esprime l'angolo tra il Sole e lo Zenit, dove quest'ultimo rappresenta una direttrice perpendicolare alla superficie terrestre in ogni suo punto, come riportato in Figura I.3.

Come sappiamo, la Terra non ruota solo attorno al Sole, ma anche attorno al proprio asse. L'asse terrestre è inoltre inclinato di $23,45^\circ$ rispetto al piano di rotazione attorno al sole. Per questo motivo il Sole è più alto nel cielo durante la stagione estiva che durante la stagione invernale.

Capitolo 1

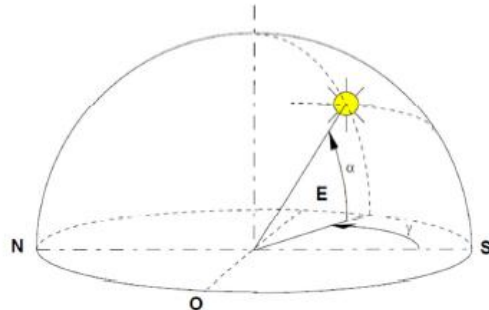


Figura I.2 Posizione del Sole

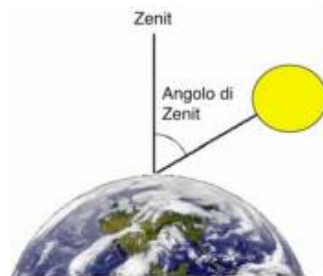


Figura I.3 L'angolo di Zenit

Il 21 marzo e il 23 settembre (equinozi di primavera e d'autunno), a mezzogiorno il Sole si trova esattamente a picco sulla linea dell'equatore. A mezzogiorno del 21 giugno (solstizio d'estate) il Sole si trova esattamente sopra al Tropico del Cancro, cioè a $23,5^\circ$ gradi latitudine Nord e a mezzogiorno del 22 dicembre (solstizio di inverno) il Sole è esattamente sopra al Tropico del Capricorno, cioè a $23,5^\circ$ gradi latitudine Sud.

Nonostante quello che potrebbe essere il parere comune, alle nostre latitudini la Terra è più lontana dal Sole durante i mesi estivi, e più vicina durante i mesi invernali. Questo potrebbe sembrare un controsenso, ma in realtà le variazioni della temperatura alle nostre latitudini dipendono soprattutto dall'inclinazione dell'asse terrestre da cui dipende l'angolo d'incidenza dei raggi solari sulla Terra, come riportato in Figura I.4. Nell'emisfero australe è esattamente il contrario, il Sole è più vicino alla Terra durante i mesi estivi e più lontano durante i mesi invernali.

L'intensità della radiazione solare sulla Terra varia con la distanza Terra-Sole, più il Sole sarà lontano, minore sarà l'intensità con cui arrivano i raggi solari. I raggi solari extraterrestri arrivano a noi maggiori durante i mesi di gennaio e di dicembre e minori durante i mesi di Giugno e Luglio.

Le ragioni per spiegare il maggior irraggiamento estivo, sono determinate dalla variazione della declinazione del Sole, cioè la diversa altezza (o declinazione) del sole a mezzogiorno (con il sole più alto nelle stagioni calde

e più basso nelle stagioni fredde). Il fenomeno dipende proprio dal fatto che, durante lo spostamento lungo la sua orbita, la Terra, a causa dell'inclinazione del suo asse, si presenta diversamente inclinata rispetto ai raggi solari.

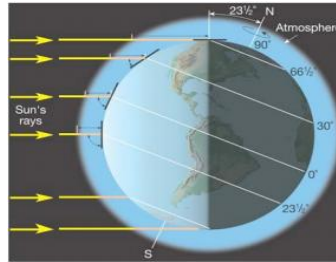


Figura I.4 L'inclinazione dell'asse terrestre

Pertanto possiamo esprimere un'altra grandezza fondamentale, ovvero l'**angolo di declinazione** solare. Tale angolo è quello che la retta tracciata dal centro della Terra al Sole forma a mezzogiorno con il piano equatoriale. Se consideriamo positivo l'angolo che esprime la declinazione del Sole quando è a Nord dell'equatore (e negativa quando è a Sud) possiamo allora esprimere la declinazione in ogni giorno dell'anno n con la formula:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen} \left[\frac{360 (n - 81)}{365} \right] \quad (\text{I.2})$$

Questo dato risulta essere molto importante, perché grazie ad esso si può determinare l'angolo di incidenza della luce solare a una determinata latitudine in un determinato giorno. Esso ha un andamento periodico durante l'anno, infatti, varia sinusoidalmente da un minimo di $-23,45^\circ$ ad un massimo di $23,45^\circ$. Più che la distanza Terra-Sole, che subisce delle relative piccole variazioni, è l'angolo d'incidenza dei raggi del sole sulla Terra che determina le stagioni. Infine, un'altra grandezza utile anche se ridondante è l'**angolo orario** ω che descrive la differenza tra la posizione a mezzogiorno e la posizione in una determinata ora rispetto al piano apparente di movimento del Sole.

1.3.2. Le componenti della radiazione solare

L'energia solare non raggiunge la superficie terrestre in maniera costante, la sua quantità varia durante il giorno, da stagione a stagione e dipende dalla nuvolosità, dall'angolo di incidenza e dalla riflettenza delle superfici.

È importante quindi fornire alcune definizioni utili, quando si parla di energia solare si intende:

Capitolo 1

- **radiazione:** energia emessa, trasportata o ricevuta in forma di onde elettromagnetiche, espressa in kWh;
- **radianza:** rapporto tra la potenza raggiante incidente su una determinata superficie e l'area della superficie stessa, espressa in kW/m²;
- **irraggiamento:** energia ottenuta integrando nel tempo la radianza sulla superficie, espresso in kWh/m²;
- **irraggiamento globale orizzontale:** energia integrale nel tempo della radianza globale sul piano orizzontale;
- **irraggiamento globale extraterrestre:** irraggiamento globale fuori dall'atmosfera terrestre misurato su un piano parallelo al piano orizzontale terrestre;

Lo spettro solare e, quindi, la potenza utile qualsiasi sistema che sfrutti la fonte solare sono influenzati dal fatto che i raggi devono attraversare l'atmosfera terrestre. Quando la radiazione solare attraversa l'atmosfera terrestre essa viene parzialmente assorbita, riflessa, diffusa e trasmessa direttamente. Sulla superficie terrestre lo spettro solare viene di conseguenza sia attenuato che mutato in forma. L'atmosfera causa una riduzione sull'ingresso di radiazione solare di circa il 30% in un giorno molto terso e quasi del 90% in uno molto nuvoloso.

L'assorbimento non varia solo in funzione del tempo ma aumenta naturalmente anche all'aumentare del percorso in atmosfera e di conseguenza in funzione della massa di aria attraverso la quale la radiazione passa. Quest'ultimo fattore è misurato in termini di **air mass** e viene definito come il rapporto fra la distanza che la radiazione attraversa nell'atmosfera terrestre e la distanza che attraverserebbe se il Sole fosse sulla normale alla superficie incidente. Lo spettro all'esterno dell'atmosfera terrestre viene designato con la sigla AM0 mentre una radiazione che passa direttamente sulla normale alla superficie definisce un'air mass AM1.0 al livello del mare. Un tipico spettro per climi moderati è AM1.5. La relazione che lega l'indice AM all'angolo di Zenit è (Kasten e Young, 1989):

$$\text{air mass} = \frac{1}{\cos \theta_z + 0,50572 (96,07995 - \theta_z)^{-1,6364}} \quad (\text{I.3})$$

A questo punto possiamo esaminare le componenti della radiazione solare che possono incidere su una superficie sulla Terra. La radiazione solare che può colpire una qualunque superficie sulla Terra è suddivisibile in tre componenti diverse, come illustrato nello schema in Figura I.6:

- **radiazione diretta:** tutta quella parte di radiazione che non subisce deviazioni nel percorso Sole – Terra;

- **radiazione diffusa:** la parte di radiazione che viene diffusa dalle particelle o dal vapore acqueo che inevitabilmente si trovano in atmosfera;
- **albedo:** la parte che raggiunge la superficie in esame per riflessione su altre superfici. Il contributo di questa componente in condizioni normali è abbastanza basso. Potrebbe avere una qualche rilevanza in caso di grandi superfici innevate.

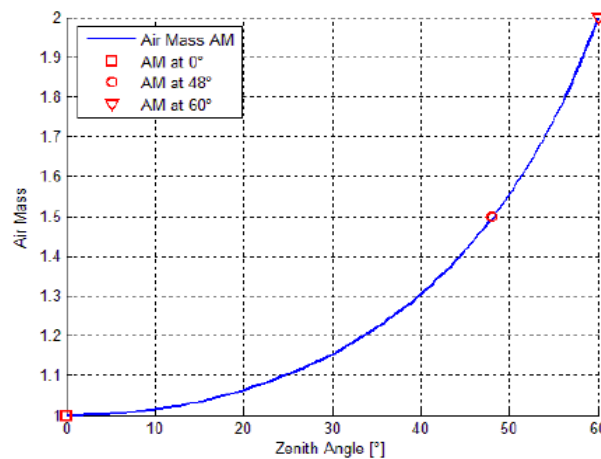


Figura I.5 Andamento dell'air mass in funzione dell'angolo di Zenit

Le proporzioni di radiazione diretta, diffusa ed albedo ricevuta da una superficie dipendono sia dalle condizioni meteorologiche, infatti in una giornata nuvolosa la radiazione è pressoché totalmente diffusa, in una giornata serena con clima secco predomina invece la componente diretta, sia dall'inclinazione della superficie rispetto al piano orizzontale, che dalla presenza di superfici riflettenti.

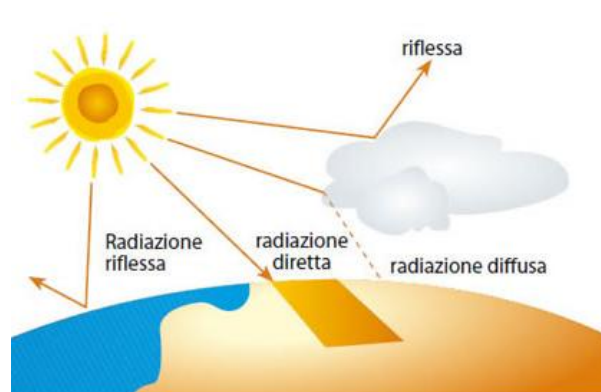


Figura I.6 Componenti della radiazione solare

Capitolo 1

Distinguere queste tre componenti è fondamentale per sistemi che sfruttano l'energia solare, nello specifico, il problema della definizione del potenziale solare per un'applicazione sarà discusso successivamente al fine di individuare un modello che permetta la previsione della radiazione globale e diretta per i sistemi che si vogliono analizzare.

1.4. I sistemi a concentrazione

I sistemi a concentrazione possono preliminarmente configurarsi come una diretta evoluzione di mercato dei sistemi fotovoltaici tradizionali (Kurtz, 2009). Sostanzialmente rispetto a tali sistemi, essi presentano maggiori efficienze nella conversione dell'energia solare (Mokri e Emziane, 2011). In questo senso, il principale aspetto da analizzare è legato al costo unitario di produzione dell'energia, infatti, ragionando in termini di semplici sistemi fotovoltaici, da un punto di vista industriale (Zhang et al., 2012), i limiti legati al costo unitario dei materiali sono stati raggiunti (Reugei e Franklin, 2009).

La principale caratteristica dei sistemi fotovoltaici a concentrazione è quella di concentrare la radiazione sulle celle solari attraverso dispositivi ottici in modo da ridurre l'area del materiale fotovoltaico in maniera direttamente proporzionale al livello di concentrazione raggiunto. Si parla, in questo senso, di fattore di concentrazione. A tal fine, tali tipi di dispositivi impiegano particolari celle solari come quelle a tripla giunzione, capaci, in parte, di mantenere buone prestazioni anche ad alte temperature (Zhai et al., 2010).

Infatti, come vedremo nel secondo Capitolo, uno dei problemi principali, legati alla concentrazione è l'aumento della temperatura delle celle (Zahedi, 2011). Ciò, con tradizionali dispositivi al silicio, conduce ad un rapido degrado del componente, rendendo la concentrazione una strada non percorribile. Al contrario, le celle a tripla giunzione, non solo presentano maggiori rendimenti in condizioni standard, ma mostrano anche ottime prestazioni con l'aumento della temperatura (Cotal et al., 2009).

Tuttavia, un semplice sistema CPV, non porta ad una riduzione dei costi unitari di produzione dell'energia. Come accennato in precedenza, l'idea di poter sfruttare differenti vettori energetici permette una riduzione complessiva dei costi unitari. In questo senso, i sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione (CPV/T) consentono l'ottenimento di vettori multipli di energia, non solo elettrica ma anche termica e frigorifera.

Concettualmente, in un sistema fotovoltaico a concentrazione, il materiale fotovoltaico è sostituito da materiale più economico, utilizzato per i dispositivi ottici (vetro, plastiche, ecc.), pertanto tale tecnologia possiede un grande potenziale poiché consente una sostanziale riduzione dei costi.

In Figura I.7(a) è possibile osservare una schematizzazione di un concentratore, si può notare come la lente consenta di concentrare la luce su

una piccola cella solare. In Figura 1.7(b), invece, a titolo di esempio, è mostrato come concentrando circa 500 volte la luce del Sole sia necessaria una piccola superficie (rossa) per ottenere la stessa potenza fornita dall'intera area verde, sulla quale non viene concentrata la luce.

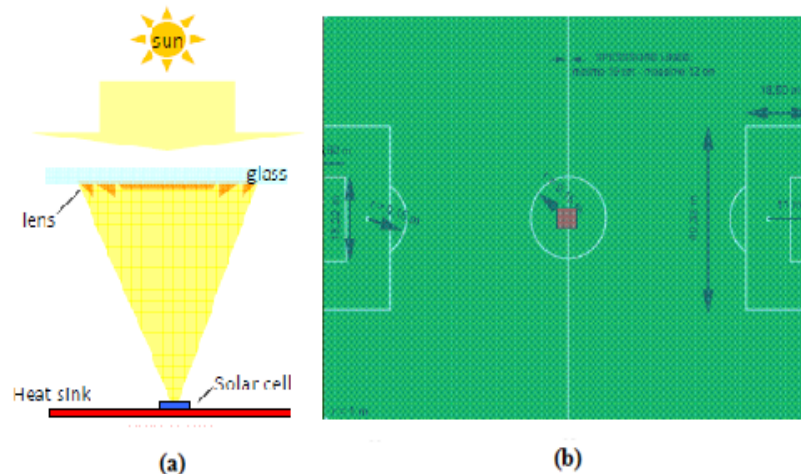


Figura I.7 (a) schema di un concentratore, (b) esempio

Inoltre, l'efficienza delle celle solari aumenta con il fattore di concentrazione, rendendo il sistema CPV il più efficiente tra le tecnologie basate sul fotovoltaico. In particolare come detto, le migliori performance sono ottenute utilizzando celle solari multi – giunzione (MJ) costituite dagli elementi del terzo e del quinto gruppo della tavola periodica, i quali erano precedentemente utilizzati solo per le applicazioni spaziali. Ad esempio, con celle MJ con efficienza del 35% ed una superficie di 100 mm^2 sulla quale è concentrata la luce 500 volte, è possibile ottenere la stessa potenza che si avrebbe con 7 m^2 di una cella in silicio con un'efficienza del 18%. Le celle MJ possono raggiungere alti valori di efficienza dato che riescono ad estrarre maggiore energia dal range di lunghezze d'onda della radiazione solare. Sostanzialmente come visibile dalla figura I.8, la luce è assorbita in maniera selettiva da diversi strati che compongono la cella. La radiazione UV è assorbita dallo strato in alto, la luce visibile da quello medio, mentre la radiazione infrarossa è assorbita dallo strato inferiore della struttura.

La caratteristica appena descritta per tale tipo di cella, consente un significativo aumento del voltaggio mentre si riducono simultaneamente le perdite di energia in calore. Per tale ragione, i sistemi fotovoltaici a concentrazione rappresentano un settore, all'interno del campo delle energie rinnovabili dal solare, in cui la ricerca sta progredendo rapidamente.

Differentemente dai classici pannelli fotovoltaici, i sistemi CPV convertono essenzialmente la radiazione solare diretta (DNI) ed hanno necessità di inseguire il moto del Sole nel cielo.

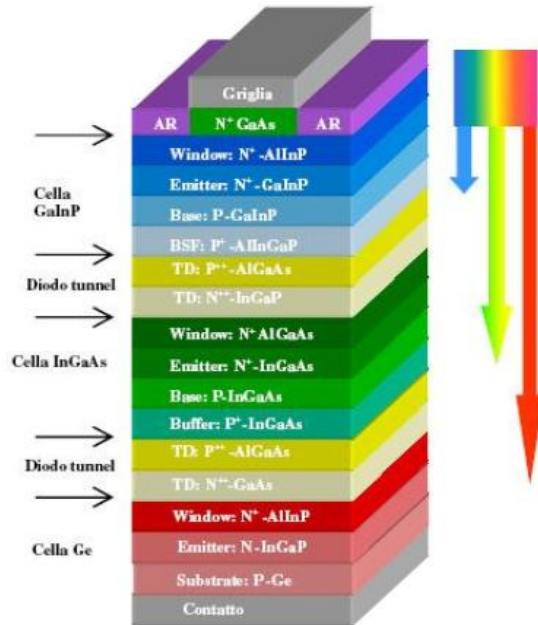


Figura I.8 Cella solare MJ

I sistemi a concentrazione, quindi, raggiungono un ottimo livello prestazionale solo in presenza di luce diretta. A questo punto, allora, la fascia meridionale dell'Europa, la fascia tropicale e quella equatoriale risultano agevolate per lo sfruttamento di tale tecnologia. I vantaggi principali sono:

1. Riduzione utilizzo di silicio: ciò determina una riduzione dell'impatto ambientale e dei processi di smaltimento oltre a quello dei costi. Ad esempio, si consideri che, nel caso del pannello di silicio piano, il costo di un impianto fotovoltaico è determinato per il 50% dal modulo fotovoltaico.
2. La produzione di energia elettrica si concentra in più ore della giornata: lo sfruttamento dell'irraggiamento solare diretto obbliga all'utilizzo di un sistema d'inseguimento che pone un vantaggio considerevole rispetto a strutture fisse in quanto segue il sole durante tutta la sua traiettoria.
3. Maggiore efficienza delle celle: la riduzione d'area consente l'utilizzo di celle MJ che hanno un'efficienza superiore al 40% mentre le celle tradizionali arrivano a circa 18% (Green et al., 2016).
4. Possibilità di definire un sistema per la produzione combinata di energia.

Gli svantaggi principali sono:

1. Sistema di puntamento molto preciso in quanto una non corretta focalizzazione dello spot di radiazione solare sulla cella comporta un crollo dell'efficienza.
2. Assorbimento della radiazione da parte degli elementi ottici: l'utilizzo di elementi ottici porta,, inevitabilmente, l'assorbimento di parte della radiazione. Si tenga conto che le migliori lenti a concentrazione raggiungono efficienze ottiche del 85% (Brogen, 2004).
3. Necessità di dissipazione del calore: concentrare luce sulla cella pone il problema della dissipazione del calore sia per non danneggiare la cella, sia per evitare la caduta in efficienza della stessa (Chemisana, 2011).
4. Sfruttamento della sola componente diretta della radiazione solare: un concentratore raccoglie esclusivamente quella diretta che rappresenta l'80% circa del totale.
5. L'assenza di informazioni riguardanti l'affidabilità della tecnologia e necessità di una continua e attenta pulizia e di maggiori operazioni di manutenzione.
6. La presenza di una grande varietà di tipologie di concentratori, che ha sparso gli sforzi per diversi percorsi tecnologici, impedendo un rapido sviluppo nei confronti dell'applicazione industriale di un sistema standard.
7. L'assenza di norme internazionali e standard condivisi;

Si può quindi desumere che ci siano molti aspetti da analizzare nella definizione di un sistema a concentrazione. Nello specifico, vanno analizzate le finalità, le tipologie di componenti, le varie configurazioni, gli effetti ottici, elettrici e termici. Inoltre l'assenza di uno standard definito, non permette di poter avviare l'analisi in maniera uniforme. In questo senso, l'esistenza di molteplici sistemi a concentrazione che differiscono per componenti e performance ottenute, prelude l'analisi dei principali fattori che impattano sul sistema a concentrazione, dei componenti ed un'analisi dei sistemi presenti.

1.4.1. Analisi dei componenti di un sistema a concentrazione

In questa sezione, riassumiamo le principali caratteristiche di un sistema a concentrazione, al fine di poter analizzare ciascun componente nello specifico, dopo aver compreso i fattori che impattano sul sistema.

Il principio su cui si basa la tecnologia del **solare fotovoltaico a concentrazione**, consiste nel focalizzare la radiazione solare su celle fotovoltaiche di dimensioni significativamente inferiori a quelle convenzionali, conseguendo vantaggi in termini di efficienza e di costi.

Capitolo 1

Il parametro che caratterizza l'intensità della concentrazione di un dispositivo di questo genere è il fattore di concentrazione. Una superficie A colpita dalla radiazione solare può convogliare le radiazioni verso una superficie più piccola (a) tramite un dispositivo ottico, l'energia elettrica ricavabile è equivalente a quella della superficie più grande e il rapporto di concentrazione (geometrico) può essere preliminarmente definito come (Renno e Petito, 2013):

$$C = \frac{A_{cp}}{A_{cella}} \quad (I.4)$$

Dove A_{cp} , è l'area del concentratore ottico primario.

Un sistema fotovoltaico a concentrazione risulta pertanto composto fondamentalmente da tre parti:

1. **ottica di focalizzazione**, ovvero l'elemento che permette di concentrare la luce solare sul ricevitore, in genere costituito da lenti o specchi;
2. **ricevitore**, cioè il componente che consente di catturare la radiazione solare per trasformarla in energia elettrica, e che comprende, di solito, sia la cella fotovoltaica che il sistema di dissipazione del calore;
3. **inseguitore solare**, dispositivo che garantisce al sistema il puntamento del sole in ogni istante, e può essere a singolo asse o a doppio asse.

Si può osservare come il ricevitore costituisca un elemento molto complesso in quanto, oltre all'alloggio delle celle deve tener conto:

1. della disposizione delle stesse, ciò porta a differenti configurazioni di un sistema a concentrazione;
2. del sistema di smaltimento (passivo) o recupero (attivo) del calore, ciò sostanzialmente divide i sistemi CPV dai sistemi CPV/T.

L'ottica di focalizzazione oltre ad incidere sulle prestazioni in termini di concentrazione, ha un ruolo chiave sia nell'energia prodotta in quanto deve essere in grado di convogliare al meglio la radiazione incidente, sia nell'ingombro dell'intero sistema. La bontà dell'ottica dipende dalla sua efficienza ma anche da come geometricamente è in grado di accogliere i raggi solari con la loro inclinazione. In questo senso, definiremo un parametro importante che è l'angolo di accettazione.

In base a tali definizioni, i parametri da scegliere sono differenti e costituiscono sia caratteristiche intrinseche del sistema, quali ad esempio la concentrazione da raggiungere, sia componenti necessari per il

raggiungimento di determinati obiettivi. In generale, parlando di un sistema a concentrazione sia CPV che CPV/T, le principali scelte sono legate a:

1. livello di concentrazione;
2. tipologia di ottica;
3. configurazione e tipo di celle solari;
4. sistema di raffreddamento;
5. inseguimento.

1.4.2. Il fattore di concentrazione

Il fattore di concentrazione rappresenta il parametro più importante di un sistema CPV o CPV/T. Esso è espressione non solo delle prestazioni, ma anche del costo del concentratore. Si può ritenere che ci sia una correlazione diretta tra le due voci, al crescere del fattore di concentrazione cresce la qualità dell'ottica impiegata e, quindi, i costi.

La definizione fornita in precedenza di tale fattore è riconducibile ad una misura geometrica, pertanto si può definire fattore di concentrazione geometrico C_{geo} come:

$$C_{geo} = \frac{A_1}{A_2} \quad (I.5)$$

Dove A_1 è la superficie esposta alla radiazione ed è ortogonale ad essa mentre A_2 è la superficie su cui la medesima viene trasmessa. Tale misura rappresenta un valore della concentrazione di un flusso solare ideale distribuito uniformemente sull'area di apertura del ricevitore. Viene poi definito un secondo fattore di concentrazione, che tiene conto dell'ottica, e fornisce un'informazione di tipo puntuale. È infatti, impossibile ottenere una concentrazione puntuale, di conseguenza, la radiazione concentrata al ricevitore, è distribuita in una regione più vasta, con un'alta concentrazione di energia nel centro di questa regione, decrescente verso le regioni periferiche del ricevitore, come evidenziato in Figura I.9

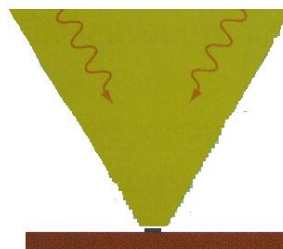


Figura I.9 Fascio incidente sulla cella

Capitolo 1

Pertanto nella realtà la potenza radiante su A_1 non è la stessa misurabile su A_2 . Ciò è dovuto al fatto che lungo il cammino una parte non trascurabile del fascio si disperde e non raggiunge la superficie A_2 . Generalmente si ha che:

$$C_{\text{geo}} \neq \frac{I_1}{I_2} \quad (\text{I.5})$$

Dove I_1 ed I_2 corrispondono alle radianze medie incidenti sulle due superfici. Si può definire, quindi, il fattore di concentrazione ottico C_{opt} come il rapporto delle potenze radianti sulle due superfici A_1 e A_2 :

$$C_{\text{opt}} = \frac{I_1}{I_2} \quad (\text{I.6})$$

Stimare il coefficiente di concentrazione ottica a partire dalla geometria e dalle caratteristiche fisiche del concentratore non è banale: in generale sono necessarie tecniche di ray-trace in grado di modellare adeguatamente anche le discontinuità delle superfici. Più spesso è un dato che viene misurato sperimentalmente, come fatto anche nel presente lavoro e discusso nel Capitolo 5.

Si può quindi osservare la dipendenza tra i due fattori (Renno e Petito, 2013)

$$C_{\text{opt}} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \eta_{\text{opt}} = C_{\text{geo}} \cdot \eta_{\text{opt}} \quad (\text{I.7})$$

Dove η_{opt} è il rendimento ottico del dispositivo di focalizzazione adottato. Ci riferiremo sempre al fattore ottico quando parliamo di fattore di concentrazione C . In questo senso, si può osservare la sua dipendenza dalla qualità dell'ottica. Il rendimento ottico può quindi essere definito come:

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{C_{\text{opt}}}{C_{\text{geo}}} \quad (\text{I.8})$$

Risulta evidente che la scelta del livello di concentrazione, non sia un qualcosa di indipendente dalle caratteristiche del sistema da progettare, ma è fortemente legata sia alla componentistica sia alle prestazioni energetiche da raggiungere. La valutazione di C di un sistema a concentrazione, quindi, passa anche da una valutazione sperimentale dell'ottica impiegata. Il fattore di concentrazione incide in maniera diretta ed indiretta sul sistema, pertanto sia la sua stima che la sua influenza rappresentano dei problemi, come analizzato nel Capitolo 2.

1.4.3. L'angolo di accettazione

L'**angolo di accettazione** è stata definito come l'angolo formato tra la semiretta congiungente il modulo a concentrazione ed il sole con l'asse del sistema ottico di raccolta. In altri termini è l'angolo θ , tra direzione del sole e

la normale al sistema ottico del concentratore, per il quale la radiazione incidente si riduce al 90% rispetto al valore massimo. L'angolo di accettazione di un sistema a concentrazione è tanto più piccolo quanto più alto è il rapporto tra la superficie dell'ottica che raccoglie la luce e quella del ricevitore. Per un sistema ottico ottimale esso dipende dal fattore di concentrazione ed incide sulla precisione del sistema di inseguimento che quindi sarà espressa come funzione di $\theta(C)$. La tolleranza angolare viene ulteriormente ridotta se il sistema ottico non è ottimale e quindi se $\theta_c < \theta(C)$, con θ_c angolo di accettazione del sistema ottico reale. Quindi l'angolo di accettazione rappresenta quell'ampiezza del campo dell'angolo d'incidenza della radiazione solare per cui il concentratore è in grado di convogliare l'energia solare sul ricevitore.

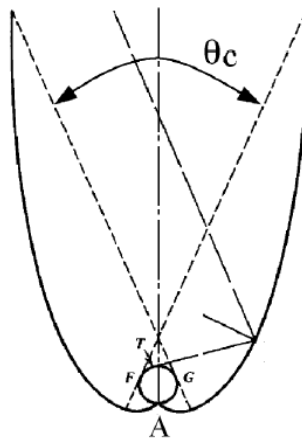


Figura I.10 Angolo di accettazione

Per sistemi non – imaging, un concentratore ha la sola funzione di focalizzare la luce solare sulla cella, ma non di creare l'immagine del sole su di essa. Questo fa sì che i vincoli sull'angolo di accettazione siano meno stringenti rispetto ai sistemi di focalizzazione d'immagine. L'area su cui viene concentrata la luce non è puntiforme, quindi i raggi che colpiscono il concentratore non devono essere necessariamente paralleli all'asse ottico dell'apparato. L'angolo tra l'asse del concentratore e la luce incidente non deve superare un angolo limite $\theta(C)$. La relazione tra tale angolo e il fattore di concentrazione si può trovare da un'analisi prettamente geometrica [26]:

$$\theta(C) = \arcsin \sqrt{\frac{1}{C}} \quad (I.9)$$

. Il rapporto di concentrazione è direttamente legato all'angolo di accettazione, come visto, pertanto possiamo esplicitarlo dalla formulazione precedente:

Capitolo 1

$$C = \frac{1}{\sin^2(\theta_c)} \quad (\text{I.10})$$

Da questa relazione è possibile trovare un limite teorico al fattore di concentrazione C . Infatti, nonostante il Sole possa essere considerato una sorgente all'infinito, esso non è puntiforme ma un disco. La divergenza solare determina come angolo minimo 0.266° . In corrispondenza di quest'angolo si avrà un fattore di concentrazione massimo pari a $5.3 \cdot 10^4$.

In definitiva, tale angolo rappresenta un parametro molto importante e, per alte concentrazioni, tale angolo si riduce, quindi è richiesto un sistema di inseguimento molto preciso. Difatti possiamo osservare in Figura I.11, considerando un concentratore ideale, su cui incide una radiazione con angolo massimo di accettazione θ_{\max} , questo ha un'efficienza massima pari ad 1 fino a θ_{\max} e per $\theta > \theta_{\max}$ il rendimento è pari a zero.

Purtroppo i sistemi reali presentano diverse perdite che fanno sì di non concentrare tutti i raggi all'interno della superficie d'uscita, perciò l'efficienza ha un andamento reale che corrisponde alla linea rossa del grafico.

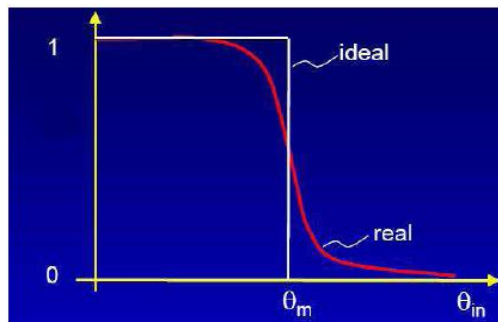


Figura I.11 Efficienza di concentrazione in funzione dell'angolo di accettazione

1.4.4. L'ottica di focalizzazione

La tecnologia dei concentratori deve essere supportata da un'efficace tecnica di progettazione degli apparati ottici. Questi devono essere in grado di funzionare in perfetto allineamento col disco solare, ma anche saper gestire situazioni di disallineamento. Nel caso di concentratori composti da più elementi ottici è buona norma progettare ogni componente ottico singolarmente, per poi a assemblare virtualmente tutto il sistema prima di passare all'eventuale produzione.

Un sistema ottico può essere immaginato come una scatola nera, caratterizzato da un ingresso formato da una certa area A ed un'uscita caratterizzata da un'area $a < A$. L'obiettivo è quello di cercare di trasferire la

massima radiazione luminosa da una fonte ad un obiettivo tramite il concentratore.

Il sistema ottico pertanto rappresenta un elemento fondamentale di un sistema fotovoltaico a concentrazione. Sostanzialmente le principali ottiche utilizzate racchiudono dispositivi di tipo:

- **rifrattivo:** quali lenti prismatiche, lenti di Fresnel, filtri dicroici, ecc., in cui la luce solare viene deviata e indirizzata sul ricevitore attraversando un mezzo diverso dall'aria (vetro, materiale plastico, ecc.) e può essere scomposta anche nelle sue componenti spettrali;
- **riflessivo:** solitamente specchi, in cui la luce solare viene deviata dalla sua direzione di incidenza e riflessa verso il sistema ricevitore senza essere scomposta nelle diverse componenti spettrali;
- **ibridi:** presentano sistemi di rifrazione e riflessione.

I sistemi a concentrazione possono montare ottiche secondarie interposte tra il collettore e il ricevitore. Le ottiche secondarie ricevono la radiazione dall'ottica primaria e la focalizzano sul ricevitore. Con le ottiche secondarie è possibile aumentare l'angolo di accettazione, incrementare il rapporto di concentrazione, uniformare la densità di potenza incidente sulle celle fotovoltaiche, cambiare la forma dello spot o ottenere una combinazione di questi effetti.

La concentrazione finale di un sistema a due ottiche è il prodotto fra le concentrazioni dell'ottica prima e dell'ottica secondaria, come dimostreremo nel Capitolo 5, in sede di analisi sperimentale.

1.4.4.1. Ottiche rifrattive

Le ottiche primarie rifrattive sono principalmente costituite da lenti di Fresnel o lenti sferiche. Le lenti di Fresnel sono realizzate con materiali poco costosi, in genere plastiche acriliche, sono più sottili e risultano complessivamente meno costose rispetto a quelle sferiche. In Figura I.12 sono riportate i diversi tipi di lenti e sono messe a confronto per quanto riguarda le dimensioni. Sono stati prodotti vari tipi di lenti di Fresnel allo scopo di aumentare l'efficienza del sistema in concentrazione raggiungendo sia alti valori di trasmittanza che di concentrazione. Le lenti di Fresnel rappresentano al momento attuale il tipo di ottica rifrattiva maggiormente utilizzato nei sistemi a concentrazione.

Esse risultano molto sottili e sono ottenute da una lente ordinaria, sezionata in anelli circolari, dal centro sull'asse ottico, mantenendo solo il bordo di ogni sezione concentrica. Il risultato è una lente con spessore di pochi millimetri (4 – 5 mm), caratterizzata da una simmetria ad anelli concentrici.

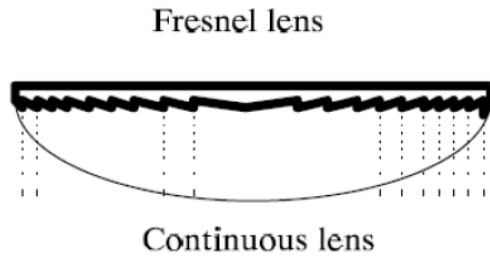


Figura I.12 Confronto tra una lente di Fresnel ed una lente sferica

Tipicamente le lenti di Fresnel sono realizzate in materiali plastici su supporto vetroso e possono raggiungere livelli di trasmissione tra l'80% e il 95% in un ampio intervallo spettrale (400-1100 nm).

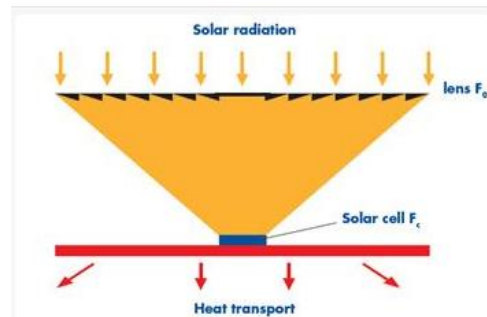


Figura I.13 Lente singola

In Figura I.13 si può osservare una lente singola dedicata ad un'unica cella; la lente di Fresnel è caratterizzata quindi dal fatto di avere una larga apertura, e rappresenta la tecnologia più facile da usare per iniziare con un prototipo. Le lenti funzionano secondo il principio della rifrazione, quindi, quando un raggio luminoso incide sulla superficie di separazione fra due mezzi, con indice di rifrazione diverso, viene rifratto secondo la **legge di Snell**:

$$n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \sin\alpha_2 \quad (\text{I.11})$$

con n_1 ed n_2 indici di rifrazione dei mezzi. L'indice di rifrazione è generalmente una funzione $n(\lambda)$ con λ lunghezza d'onda della luce incidente. Per questo motivo l'approccio rifrattivo comporta la presenza dell'aberrazione cromatica. Tale fenomeno è dannoso per l'efficienza del sistema fotovoltaico, in quanto le celle, soprattutto quelle multi-giunzione sono ottimizzate per ricevere tutto lo spettro in modo uniforme, l'eventuale non uniformità provoca uno sbilanciamento delle correnti. I principali problemi nell'impiego di ottiche rifrattive sono:

- **Aberrazione cromatica:** Tale fenomeno può rendere difficoltoso il concentrare tutta la luce all'interno della superficie del semiconduttore. Idealmente l'area della cella deve essere illuminata uniformemente. In presenza di aberrazione cromatica, se la focalizzazione è corretta per la luce verde, parte della luce rossa uscirà dal contorno della cella mentre la luce blu ne coprirà solo una sua porzione, come mostrato in Figura I.14. L'effetto è una riduzione dell'efficienza della cella.
- **Assorbimento:** Parte della radiazione viene assorbita, generalmente si considera che il 90% della luce venga trasmessa e il restante 10% venga riflessa. Questo fatto impone di ridurre al minimo il numero di componenti ottici visto che la potenza che giunge sulla cella viene moltiplicata per un fattore 0.9^n , con n lenti impiegate rispetto alla potenza che incide sull'ottica primaria.
- **Ingiallimento:** La lente si ingiallisce a causa del deterioramento col passare del tempo, questo provoca una riduzione del coefficiente di trasmissione.

I vantaggi di queste lenti sono i costi minori rispetto alle lenti tradizionali nonché un peso inferiore. Purtroppo sono caratterizzate da un fuoco non ben localizzato il che le rende poco interessanti per impieghi in sistemi ad alte concentrazioni, a meno di qualche accorgimento. In tal senso, per ridurre la precisione di puntamento richiesta da questi sistemi, viene spesso adottata la soluzione di inserire sotto la lente principale un sistema **ottico secondario**, che consiste in genere in piccoli coni la cui superficie interna è riflettente.

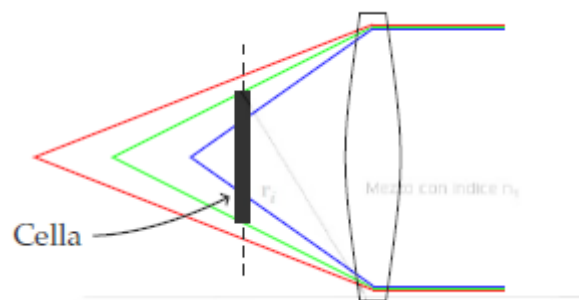


Figura I.14 Effetto dell'aberrazione cromatica sull'illuminazione di una cella

1.4.4.2. Ottiche riflesse

Le ottiche primarie riflesse sono essenzialmente costituite da specchi. Tra i vari materiali utilizzati per la loro realizzazione i principali sono

Capitolo 1

argento e alluminio. Le ottiche riflettive impiegano generalmente degli **specchi parabolici**, anche detti concentratori parabolici, i quali consentono in generale di ottenere concentrazioni molto elevate ed evitare i problemi legati all'aberrazione cromatica tipici delle lenti di Fresnel.

Uno specchio è tipicamente una lastra di vetro, con una faccia rivestita di alluminio o argento, che produce un'immagine per riflessione degli oggetti che gli stanno davanti. La procedura di realizzazione consiste nello spruzzare, sotto vuoto, un sottilissimo strato di alluminio o argento (solitamente nitrato di argento) su una delle facce di una lastra di vetro, tale procedimento è noto con il nome di "argentatura".

Quando la luce colpisce un qualsiasi oggetto, una parte è riflessa, un'altra parte assorbita e una terza trasmessa attraverso l'oggetto stesso. Affinché una qualsiasi superficie funzioni come specchio, è necessario che la luce incidente sia riflessa il più possibile e che le componenti assorbite e trasmesse siano trascurabili. Per evitare una riflessione diffusa, non speculare, la superficie di uno specchio deve essere perfettamente liscia o, comunque, presentare delle irregolarità che abbiano dimensioni più piccole della lunghezza d'onda della luce.

La qualità della superficie riflettente è misurata dal coefficiente di riflessione e dalla sua specularità. Il primo costituisce quella porzione di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere.

È quindi rappresentata dal rapporto tra l'intensità del flusso radiante trasmesso e l'intensità del flusso radiante incidente, ed è una grandezza adimensionale. La specularità rappresenta la capacità della superficie di riflettere senza dispersioni, in altre parole di riflettere con un angolo uguale e opposto all'angolo d'incidenza. I metalli lucidati sono ottimi materiali riflettenti, in particolare, l'argento ha la massima capacità riflettente per quanto riguarda lo spettro solare, con un coefficiente di riflessione che può arrivare al 98%.

Insieme alle lenti di Fresnel, gli specchi parabolici sono le ottiche più utilizzate nel fotovoltaico a concentrazione. L'angolo di accettazione di questi dispositivi risulta molto ridotto, inferiore al caso di ottiche rifrattive per cui è sempre richiesta una precisione superiore nel sistema di puntamento.

In Figura I.15 è rappresentata una parabola che dirige fasci paralleli al proprio asse sulla cella. Il ricevitore, come si vede, non va posizionato in corrispondenza del fuoco, dove si otterrebbe solo la riproduzione dell'immagine del sole su una piccola superficie. È necessario posizionare la cella prima o dopo il fuoco in modo che essa venga completamente illuminata.

Si può, inoltre, notare che la cella, e soprattutto i supporti necessari al suo posizionamento, oscura una parte dello specchio riducendo così la superficie utile del concentratore.

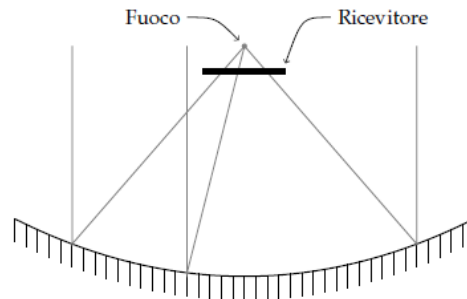


Figura I.15 *Concentratore parabolico*

1.4.5. Il ricevitore solare

Il ricevitore solare rappresenta l'elemento atto alla conversione dell'energia solare in energia elettrica e, a seconda che si parli di CPV o CPV/T, anche in energia termica. Il ricevitore è il sottosistema elettricamente attivo del modulo. Si possono identificare i seguenti componenti:

- **Cella fotovoltaica:** la cella deve essere sviluppata in modo idoneo per garantire buone prestazioni in condizioni di luce concentrata;
- **Diodo di bypass:** diodo di bypass fa in modo che su ogni cella si abbia la stessa corrente al fine di non compromettere il funzionamento di tutto il modulo;
- **Sistema di rimozione del calore (attivo o passivo):** la concentrazione della luce su superfici ridotte provoca l'innalzamento della temperatura di funzionamento della cella per cui è necessario che il calore venga rimosso.

Il ricevitore è il punto focale dei raggi luminosi concentrati. Per questo motivo deve essere realizzato in modo tale da lasciar passare il maggior quantitativo di luce possibile, contenere le perdite dovute alla dissipazione di calore e deve essere in grado di proteggere la cella solare dai fenomeni atmosferici. Talvolta il ricevitore è ricoperto da un mantello, costituito da una superficie vetrata, che garantisce il vuoto intorno al ricevitore.

Per operare alla massima produttività, le celle solari devono lavorare in un range ben delimitato di temperature. Superare tali soglie comporterebbe il verificarsi di conseguenze negative sia a breve termine come perdita di efficienza che a lungo termine come danni irreversibili alla cella. Perciò è importante progettare un adeguato sistema di raffreddamento che assicuri il mantenimento delle basse temperature, uniformità delle stesse, affidabilità e il minor consumo di potenza dell'apparato.

Capitolo 1

La rimozione del calore dalle celle fotovoltaiche può essere fatta in modo attivo, cioè forzando un fluido di raffreddamento a circolare nel dissipatore termico o in modo passivo, sfruttando gli scambi convettivi naturali con l'ambiente.

All'interno del modulo fotovoltaico le celle sono solitamente connesse in serie, in tal modo, la cella avente la temperatura più elevata limita l'efficienza dell'intera stringa di serie. Quindi il sistema di dissipazione deve essere in grado di raffreddare tutte le celle allo stesso modo. A questo riguardo è possibile realizzare dissipatori che, con il calore estratto dal raffreddamento delle celle, mediante il trasporto di un fluido alla più alta temperatura possibile verso uno scambiatore, portino un congruo aumento dell'efficienza di conversione.

Nel caso di sistemi di dissipazione passivi, la soluzione più usata prevede di disporre delle alette lineari su tutta la superficie disponibile. Per quanto riguarda i dissipatori attivi ci sono diverse tipologie di sistemi. Il principio di funzionamento si basa sullo scorrimento di un fluido termico – vettore attraverso piccoli canali paralleli tra loro in contatto termico con le celle.

Risulta evidente che la definizione del ricevitore condiziona l'intero sistema a concentrazione. In questo senso, le principali scelte da compiere sono legate a:

1. Tipologia di cella;
2. Disposizione delle celle;
3. Tipologia di sistema di rimozione del calore.

L'analisi delle celle, dei problemi ad esse legati quando si lavora in concentrazione e la loro caratterizzazione è presentata nei Capitoli successivi. Infatti, uno degli scopi del lavoro è quello risolvere il problema della modellazione e caratterizzazione delle celle in concentrazione.

Per quanto riguarda il sistema di rimozione del calore, esso costituisce uno dei punti fondamentali del lavoro. In questo senso, verranno modellati differenti sistemi per lo scambio termico attivo, nel Capitolo 4, in modo da poter valutare le prestazioni migliori in termini di energia termica prodotta.

L'ultimo aspetto da analizzare è legato alla disposizione delle celle. In questo senso, i sistemi a concentrazione, in base a come le celle sono disposte ed alle ottiche impiegate, presentano differenti configurazioni. La scelta di una configurazione, incide sulla concentrazione ottenibile e sulle prestazioni elettriche e termiche del sistema.

1.4.5.1. Configurazioni di un sistema a concentrazione

In base alla disposizione delle celle nel ricevitore è possibile valutare tre principali configurazioni di un sistema a concentrazione:

1. **Configurazione point – focus;**
2. **Configurazione line – focus;**
3. **Configurazione dense array.**

Nei sistemi point – focus, ciascuna cella prevede un’ottica di focalizzazione dedicata. Solitamente, quest’ultima è di tipo rifrattivo, anche se ci sono esempi di ottiche riflessive, come i micro specchi concentratori.

Le lenti possono essere di tipo ad immagine, cioè capaci di focalizzare in un punto l’immagine della sorgente di luce, oppure senza immagine, in questo caso non viene riprodotta nel punto focale l’immagine della sorgente. Queste ultime permettono di ridurre uno dei maggiori problemi che caratterizzano i sistemi a concentrazione, ovvero, la richiesta di una elevata precisione di puntamento dell’inseguitore solare.

Generalmente, infatti, i sistemi point – focus richiedono un angolo di accettazione maggiore. Per ridurre i problemi di puntamento, viene adottata anche la soluzione di inserire sotto la lente principale delle ottiche secondarie, come mostrato in Figura I.16.

Solitamente, nei sistemi point – focus, la concentrazione avviene su celle MJ, quest’ultime, ben separate una dall’altra, hanno dimensione estremamente ridotta. Questa soluzione è interessante perché permette di utilizzare sistemi di dissipazione di tipo passivo, è richiesto comunque un inseguimento a doppio asse.

I sistemi line – focus prevedono che la concentrazione avvenga lungo una linea dove sono alloggiati le celle, anche in questo caso, solitamente di tipo MJ. Le ottiche impiegate possono rifrattive che riflessive. Le lenti necessarie sono di forma curva a differenza dei sistemi point – focus i quali presentavano una forma piana.

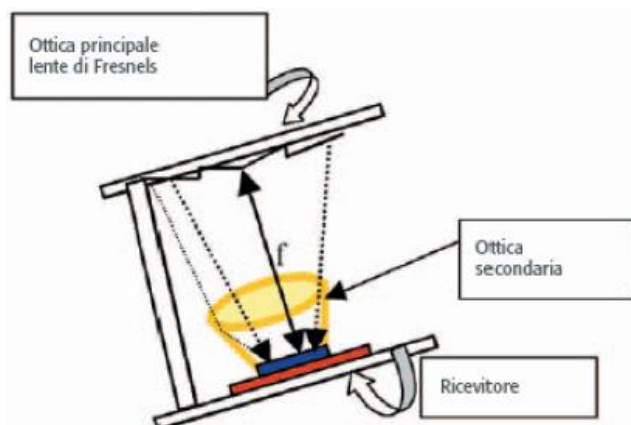


Figura I.16 Esempio di configurazione point – focus



Figura I.17 Esempio di sistema line – focus con lente curva

I sistemi dense array presentano un'ottica di focalizzazione di tipo riflessivo che fa uso di specchi parabolici, i quali consentono di concentrare la luce su una serie di celle disposte l'una accanto all'altra. Le celle impiegate sono sempre MJ, mentre il sistema ad inseguimento richiesto è a doppio asse. Tali dispositivi sono sostanzialmente utilizzati per ottenere potenze maggiori ed evitare i problemi legati all'aberrazione cromatica. In questo caso si rende necessario un sistema di raffreddamento di tipo attivo e la messa a punto di ricevitori più complessi, proprio per la necessità di rendere efficace la dissipazione del calore. Tali sistemi necessitano di una maggiore precisione nella lavorazione degli specchi di quella richiesta per le lenti dei sistemi point – focus. Per diminuire la sensibilità necessaria nella lavorazione dello specchio è opportuno considerare specchi con un distanza focale dal target minore possibile. Sono stati realizzati anche sistemi a concentrazione **ibridi** costituiti cioè sia da un ottica rifrattiva che riflessiva. Tali sistemi permettono di raggiungere fattori di concentrazione elevati.



Figura I.18 Esempio di sistema dense array

1.4.6. Sistemi di inseguimento

Un sistema a concentrazione deve necessariamente disporre di una meccanica per l'inseguimento. Tale esigenza è dovuta alla possibilità di conversione della sola componente diretta della radiazione solare. Pertanto i sistemi di puntamento consentono di raccogliere sempre la massima

quantità di energia, rendendo minimo l'angolo di incidenza sulla superficie del pannello. Come abbiamo visto in precedenza, il principio di funzionamento è legato a considerazioni di ottica geometrica. La focalizzazione sulla cella, infatti, funziona correttamente solo se i raggi arrivano da una determinata direzione, che è quella parallela all'asse ottico del sistema di lenti o specchi, altrimenti la cella non viene illuminata. I sistemi sono disegnati per focalizzare raggi che incidono in modo normale al piano di giacenza del sistema ottico, ovvero dal punto di vista pratico il dispositivo di focalizzazione deve essere sempre rivolto verso il sole. Le condizioni quindi sono più stringenti, difatti mentre per i pannelli piani ci si può permettere un certo scarto, per un inseguitore ottico l'errore di posizionamento deve idealmente tendere a zero, compatibilmente con la tecnologia in uso.

Il concetto fondamentale che si trova alla base dei sistemi di puntamento è quello di inseguire il Sole durante il suo moto apparente sia durante la giornata che nel corso dell'anno. Sostanzialmente la Terra compie una rotazione intorno al suo asse ogni 24 ore e completa una rivoluzione intorno al sole in un periodo di circa 365.25 giorni. Il percorso apparente giornaliero del Sole intorno alla Terra è descritto da alcuni angoli, descritti in precedenza:

1. **Angolo orario HRA:** rappresenta per un punto della superficie terrestre l'angolo con cui la Terra si trasformerebbe per portare il meridiano del punto direttamente sotto il Sole;
2. **Altezza solare α :** è l'angolo tra i raggi del Sole ed il piano orizzontale e rappresenta il complemento a 90° dell'angolo di zenit solare φ ;
3. **Azimuth solare z :** è l'angolo tra i raggi del Sole e la direzione sud.

La valutazione di tali angoli consente quindi di poter definire la posizione del Sole nel per ogni ora e quindi, permettere l'inseguimento.

1.4.6.1. Classificazione dei dispositivi di puntamento

Il puntamento solare può essere statico oppure si può effettuare l'inseguimento con movimentazioni ad 1 asse o a 2 assi. Nei sistemi statici rientrano anche quelli che necessitano di qualche aggiustamento annuo e sono normalmente caratterizzati da grande angolo di accettazione ($\pm 23^\circ$). Gli inseguitori ad 1 asse utilizzano prevalentemente ottiche riflesse ed hanno il vantaggio di opporre poca resistenza al vento e di essere di facile installazione in quanto sono montati vicino al terreno. Gli inseguitori a 2 assi sono invece necessari per concentrazioni superiori a 60, sia che il CPV monti collettori a specchi o a lenti e in generale per sistemi con un piccolo angolo

Capitolo 1

di accettazione. L'incremento di potenza annua prodotta dai sistemi ad 1 asse rispetto ai sistemi statici è di circa il 30 %, mentre utilizzando sistemi a 2 assi è di circa il 36% (Renno e Petito, 2015).

Gli inseguitori solari vengono suddivisi in base a:

1. Numero di gradi di libertà offerti al pannello che ospitano;
2. Alimentazione fornita al meccanismo di orientamento;
3. Tipologia di comando elettronico.

Quando il movimento avviene su due assi abbiamo la possibilità di variare sia l'orientamento che l'inclinazione rispetto all'orizzontale, mentre il puntamento con un solo asse prevede l'inseguimento su asse verticale, si parla di inseguitori di azimuth, oppure l'inseguimento su asse orizzontale, si parla di inseguitori di tilt. A seconda dei movimenti previsti si hanno pertanto inseguitori biassiali o monoassiali.

Tra gli inseguitori ad un solo grado di libertà abbiamo:

1. **Inseguitori di tilt:** (ovvero beccheggio) sono i più semplici da realizzare, e ruotano attorno all'asse Est-Ovest, Figura I.19a. Il pannello viene sollevato o abbassato, in genere manualmente due volte l'anno, verso l'orizzonte in modo che l'angolo rispetto al suolo sia statisticamente ottimale in base alla stagionalità. Questi inseguitori offrono un incremento di produzione inferiore al 10%, tanto da giustificare raramente un servomeccanismo.
2. **Inseguitori di rollio:** si prefiggono di seguire il Sole lungo la volta celeste nel suo percorso quotidiano, a prescindere dalla stagione di utilizzo. In questo caso l'asse di rotazione è Nord-Sud, Figura I.19 b. La rotazione richiesta a queste strutture è più ampia del tilt, spingendosi a volte fino a $\pm 60^\circ$.
3. **Inseguitori di azimut:** (ovvero imbardata) dispongono di un grado di libertà con asse Zenit-Nadir, asse z

Gli inseguitori a due gradi di libertà sono più sofisticati e si prefiggono di allineare perfettamente e in tempo reale l'ortogonale dei moduli con i raggi solari. Il modo più economico, ma non l'unico, per realizzarli è montare un inseguitore a bordo di un altro. Con questi inseguitori si registrano aumenti di produzione elettrica che raggiungono anche il 20%-40%, a fronte però di una maggior complessità costruttiva.

Il controllo del puntamento degli inseguitori biassiali può essere o di tipo "astronomico", pilotato quindi da un software che calcola la posizione del Sole in ogni istante e muove il sistema di conseguenza, oppure a cellula fotosensibile, in grado cioè di dirigere il verso la sorgente di luce più forte in ogni momento. Il primo metodo non risente della presenza di nuvolosità, mentre il secondo metodo non funziona in presenza di nuvole, quindi

normalmente i sensori sono utilizzati come feedback per aumentare l'accuratezza del puntamento astronomico.

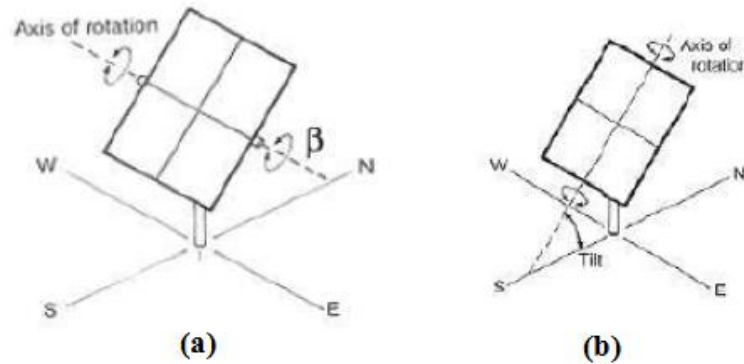


Figura I.19 (a) inseguitori di tilt; (b) inseguitori di rollio

In base all'alimentazione necessaria al movimento possiamo suddividere gli inseguitori in:

1. **Inseguitori attivi:** Si chiamano sistemi ad inseguimento solare attivo, perché il movimento del pannello è realizzato con l'ausilio di motori elettrici, del tipo passo-passo o in corrente continua, comandati attraverso circuiti elettronici di controllo. Si possono avere sistemi d'inseguimento, i cui movimenti interessano uno o entrambi gli assi di rotazione, quello orizzontale e quello verticale. La logica di funzionamento è quella di individuare la posizione del Sole con l'ausilio di un sensore dedicato e di posizionare il pannello ortogonale rispetto ai raggi. Attraverso i segnali che arrivano dal sensore, il microprocessore è in grado di "capire" quando il Sole è tramontato e di predisporre il pannello in posizione utile per il giorno successivo.
2. **Inseguitori passivi:** Grazie all'aumento della temperatura data dal Sole si ha una dilatazione termica di un corpo sia liquido, sia gassoso, sia solido che aumentando di volume viene messo in movimento il sistema di inseguimento solare orientandolo più o meno costantemente verso il Sole.

Infine gli inseguitori si distinguono sulla base della tipologia del comando elettronico che pilota il movimento in:

1. **Analogici:** in cui il comando è generato sulla base delle informazioni di un sensore che individua la posizione del punto più luminoso nel cielo.

2. **Digitali:** in cui il comando proviene da un microprocessore che, tramite sue tabelle memorizzate, conosce in ogni momento la posizione del Sole nel cielo.

1.4.7. Classificazione ed esempi di sistemi a concentrazione

La definizione di fattore di concentrazione permette, per grandi linee, di classificare i sistemi a concentrazione. Nello specifico, finora, si è fatto riferimento al fattore di concentrazione come misura dell'amplificazione della radiazione solare.

Concettualmente, tale formulazione viene proposta in tutto il lavoro, in quanto, soprattutto nella fase di analisi sperimentale, servirà come misura per i sistemi progettati. Tuttavia, nella letteratura classica si fornisce una misura della concentrazione in soli (x), dove per 1 sole, $1x$, si intende 1000 W/m^2 . Quindi risulta evidente che, quando si parla ad esempio di $500x$, si intende una radiazione di 500 volte quella di 1000 W/m^2 . Tale definizione, utilizzata soprattutto dai produttori di celle MJ per fornire i dati di targa, risulta scomoda nell'analisi sperimentale proposta, in quanto non si lega direttamente all'amplificazione rilevata, a seconda della radiazione incidente. In generale, in tabella I.1, si riporta la classificazione dei sistemi a partire dalla misura in soli della concentrazione.

Tabella I.1 *Classificazione in base alla concentrazione*

Concentrazione	Valore
Bassa	$C < 50x$
Media	$50x \leq C \leq 300x$
Alta	$C > 300x$

Tuttavia, dall'analisi di molteplici soluzioni e analizzando le possibili configurazioni di sistema, le classificazioni proposte in questo lavoro si basano su tre parametri:

1. **Livello di concentrazione:**
 - a. bassa concentrazione ($C < 100x$);
 - b. alta concentrazione ($C > 100x$);
2. **Configurazione delle celle:**
 - a. point – focus;
 - b. line – focus;

- c. dense array;
- 3. **Raffreddamento:**
 - a. passivo (sistemi CPV);
 - b. attivo (Sistemi CPV/T).

La distinzione in base alla configurazione è stata analizzata in precedenza e saranno fatti alcuni esempi di lavori in letteratura nelle sezioni seguenti. La distinzione in base al raffreddamento risulta chiara ed obiettivo di questo lavoro è proprio l'analisi di sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione. Pertanto analizzeremo alcuni esempi di letteratura, prima di passare alla definizione di un sistema CPV/T. In questa sezione, quindi, analizziamo alcuni esempi, di sistemi a bassa e alta concentrazione.

1.4.7.1. Sistemi a bassa concentrazione

Tra i sistemi a bassa concentrazione, i primi esempi sono i moltiplicatori solari. Tali sistemi sono caratterizzati da un incremento dell'energia prodotta non superiore al 100%. Visto il basso livello di concentrazione, essi utilizzano sempre pannelli di tipo tradizionale, cioè al silicio cristallino o a film sottile. Ad essi, può essere associato sempre un sistema di inseguimento, che a volte fa parte del moltiplicatore stesso, dunque risulta indispensabile, mentre altre volte è solo una possibilità di incremento aggiuntivo della prestazione del pannello. I principali esempi sono:

- **Moltiplicatore solare a specchi piani:** I pannelli tradizionali al silicio sono accoppiati a specchi piani e ad un sistema di inseguimento.. Esistono vari modi di implementare l'idea degli specchi piani. I più comuni sono quelli di porli a contatto fra loro in mezzo a due file di pannelli, oppure ai lati esterni di tali file, con il vantaggio di poterne regolare l'inclinazione e di poterli aggiungere a strutture preesistenti non progettate allo scopo.

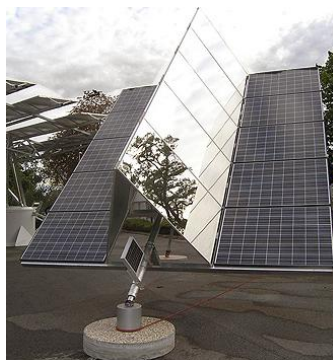


Figura I.20 Esempio di moltiplicatore a specchi piani

Capitolo 1

- **Moltiplicatore con pannelli bifacciali:** I pannelli bifacciali sono, pannelli fotovoltaici tradizionali, che presentano sul retro un vetro o una superficie trasparente al posto del supporto opaco standard. Sono combinati con specchi piani posti nella parte sottostante della struttura in modo da "illuminarli" dal basso, e con un semplicissimo e stabile sistema di inseguimento monoassiale.
- **Moltiplicatore con pellicola olografica:** Utilizzano un'ottica olografica e una tecnologia fotovoltaica di tipo tradizionale. La sottile pellicola ottica provvede a selezionare dal punto di vista spettrale la parte più "fredda" della radiazione solare per consentire alle celle fotovoltaiche di lavorare con maggiore efficienza. In un pannello, le bande di pellicola olografica sono alternate a bande di celle al silicio bifacciali. La luce che colpisce direttamente la banda fotovoltaica produce elettricità nel modo normale. La luce che, invece, colpisce la banda con la pellicola olografica è incanalata attraverso il vetro fino alla superficie delle celle e convertita in elettricità.

I sistemi fotovoltaici a bassa concentrazione sono in generale degli apparati, quindi non necessariamente pannelli a concentrazione. Alcuni di questi pannelli sono fissi, altri usano inseguitori monoassiali, o biassiali. Tra i pannelli a bassa concentrazione possiamo riconoscere:

- **Pannelli con concentratori a lenti lineari:** L'ottica usata consiste di particolari piccole lenti lineari fisse, che concentrano la luce su strisce di normale materiale fotovoltaico in film sottile.
- **Pannelli fissi con lenti:** Sono rappresentati da pannelli tradizionali dove ciascuna cella presenta un'ottica rifrattiva, tipo quella di Fresnel per ottenere una concentrazione massima di 10x. Poiché il rapporto di concentrazione è molto basso, le lenti riescono a catturare non solo la luce solare diretta, ma anche quella diffusa entro 6° di inclinazione rispetto alla luce diretta, e soprattutto non occorre usare un sistema di inseguimento.
- **Pannelli ad eliotubi:** Il pannello è formato da tubi che inseguono il Sole durante il giorno con movimento monoassiale. Ciascun tubo combina insieme una lente direzionale lineare e degli specchi riflettenti per concentrare la luce sulla superficie fotovoltaica, composta da comuni celle al silicio, con un rapporto di concentrazione di 10x.

Tra i sistemi a bassa concentrazione abbiamo:

- **Concentratore lineare a “W”**: È un sistema modulare lineare che impiega pannelli al silicio monocristallino montati su una struttura insieme a degli specchi riflettenti posti a forma di "W". I vari specchi utilizzati hanno una forma leggermente parabolica e catturano la luce solare riflettendola sulla striscia di pannelli posta loro di fronte.
- **Concentratore lineare fotovoltaico – termico**: Sono utilizzati per produrre simultaneamente elettricità e acqua calda per riscaldamento e usi sanitari. Come mostrato in Figura I.21, un lungo specchio parabolico lineare concentra i raggi solari sul ricevitore lineare posto nel fuoco. Il ricevitore ospita le celle solari, mentre l'acqua che corre in un tubo interno al ricevitore stesso cattura il calore in eccesso per gli usi termici desiderati.



Figura I.21 Esempio di concentratore termo – fotovoltaico

1.4.7.2. Sistemi ad alta concentrazione

I sistemi fotovoltaici ad alta concentrazione comprendono tutti quegli apparati solari, che sfruttano in maniera spinta la concentrazione della luce del Sole per produrre elettricità, talvolta accoppiata anche allo sfruttamento termico grazie all'elevato calore prodotto.



Figura I.22 Ottica a guida di luce

Tali sistemi utilizzano sia lenti che specchi accoppiate a celle sempre di tipo MJ. Quando il livello di concentrazione è elevato, occorre un sistema di

Capitolo 1

raffreddamento ad alta capacità per le celle solari, onde evitarne il danneggiamento. Il sistema di inseguimento è sempre biassiale

Con l'impiego di lenti, all'aumentare del rapporto di concentrazione cresce la profondità ottica oppure lo spessore della lente, con maggiori perdite di luce e costi. Per questo, sono state sviluppate ottiche proprietarie, compatte con lenti molto sottili come ad esempio quelle a guida di luce, in Figura I.22, che permettono anche fattori superiori a 1000x.

A parte particolari soluzioni con ottiche proprietarie o lenti di Fresnel impiegate "ad hoc" su specifici pannelli, i sistemi ad alta concentrazione, in qualsiasi configurazione, impiegano solitamente ottiche riflettive. I due principali esempi sono:

- **Concentratore con micro specchi:** Tale struttura sfrutta una configurazione point – focus. Gli specchi riflettono la luce solare su un ricevitore, costituito da una cella MJ, posto nel fuoco della parabola. Il sistema prevede anche un raffreddamento attivo, con un fluido termo – vettore che scorre dietro i ricevitori ed un inseguitore biassiale, come mostrato in Figura I.23.
- **Concentratore parabolico a specchi multipli:** In questo caso la configurazione impiegata è di tipo dense array. Gli specchi formano un paraboloide che riflette su un fuoco dove sono alloggiate le celle fotovoltaiche MJ. Il sistema richiede un raffreddamento attivo del modulo di celle ed un inseguitore biassiale, come già osservato in Figura I.18.

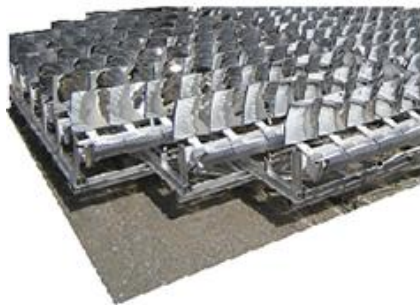


Figura I.23 Esempio di concentratore con micro specchi

1.5. Analisi della letteratura sui sistemi a concentrazione

Lo studio dei sistemi a concentrazione ha rappresentato una tematica centrale nel dibattito internazionale circa i sistemi ad energia solare (Sharaf e Orhan, 2015 a). In particolare, come detto in precedenza, i sistemi a

concentrazione non mostrano standard condivisi, pertanto molti ricercatori hanno sviluppato prototipi differenti. In generale, le principali linee guida sulle quali si è mossa la ricerca scientifica sono:

- Tipologie di ottica impiegate;
- studio delle prestazioni delle celle MJ in concentrazione;
- analisi delle principali configurazioni;
- studi sulla producibilità elettrica;
- studio di soluzioni per il raffreddamento attivo;
- studio di sistemi a concentrazione per la produzione combinata di energia.

Quindi i differenti filoni di ricerca, nella maggior parte dei casi, tendono a sviluppare modelli e prototipi per risolvere parte del problema complessivo. Nello specifico, la definizione integrata di un modello a concentrazione, viene spesso tralasciata per occuparsi di aspetti salienti ma limitati dello studio.

In questo lavoro, visto che l'obiettivo è quello di affrontare la definizione, l'analisi teorico – sperimentale e la gestione energetica di un sistema a concentrazione, si sono osservati nel complesso, i modelli e gli sviluppi di ciascun lavoro al fine di poter comprendere come intervenire.

In questo senso, quindi, si possono osservare svariate tipologie di sistemi, sia CPV che CPV/T sviluppati, in parte o complessivamente.

Va, inoltre, notato che molto spazio occupano i sistemi CPV/T (Sharaf e Orhan, 2015 b), in quanto rappresentano soluzioni scientificamente molto valide che possono condurre ad evidenti vantaggi nella produzione combinata di energia. Pertanto, in questa sezione investighiamo i principali lavori riguardanti i CPV ed i CPV/T, analizzando le tipologie di sistemi progettati per lo scambio termico.

1.5.1. Principali studi di CPV e CPV/T

Esistono molteplici tipologie di sistemi a concentrazione che, principalmente, si differenziano per il modo in cui la radiazione solare viene concentrata sul ricevitore e pertanto sono classificati in base al fattore di concentrazione (Renno e Petito, 2013).

Molti studi analizzano i vantaggi della concentrazione sulle performance elettriche, in questo senso si valutano principalmente sistemi CPV. Ad esempio Vossier et al. hanno affrontato lo studio ed il modello di un sistema a bassa concentrazione con un concentratore parabolico (Vossier et al, 2012). Invece, in (Li et al, 2011) viene investigata la possibilità di impiegare un'array di celle con elevate performance, come le celle GaAs, al posto delle celle tradizionali. In questo caso, la concentrazione è ottenuta con un sistema lineare ed è presente un primo esempio di sistema attivo per il recupero

Capitolo 1

termico, con la presenza anche di un serbatoio di accumulo. Tuttavia, lo scopo principale in questo lavoro è rappresentato dal raffreddamento delle celle, non dal recupero termico, pertanto anche un sistema di raffreddamento passivo viene mostrato (Li et al, 2011).

Kribus et al. mostrano un sistema CPV/T di piccole dimensioni basato su un concentratore parabolico che sfrutta una configurazione point – focus. In questo lavoro, un particolare tipo di trasferimento di calore è utilizzato al fine di raffreddare le celle (Kribus et al, 2006). L'efficienza termica raggiunta è di circa il 60% con un'efficienza elettrica del 20 %. In (Mittleman et al, 2007), invece, viene presentata una particolare applicazione dei sistemi CPV/T. Infatti, quest'ultimo viene collegato ad una pompa ad assorbimento di tipo LiBr/H₂O, realizzando così un sistema di solar cooling.

Molto importante è anche l'analisi dei differenti sistemi ad inseguimento, soprattutto nella possibilità di incrementare notevolmente le performance energetiche (Mousazadeh et al., 2009).

Kandilli ha, invece, sviluppato un particolare tipo di piatto concentratore connesso ad un sistema di tubi evacuati, impiegati per migliorare lo scambio termico (Kandilli, 2013). In (Kosmadakis et al., 2011) viene presentato un sistema CPV/T connesso ad un ciclo organico di Rankine al fine di aumentare la produzione di energia elettrica. Al-Alili et al., invece, accoppiano il sistema CPV/T con un impianto ad aria condizionata al fine di separare il carico latente dal carico sensibile (Al-Alili et al., 2012). In (Aldegheri et al., 2014) un sistema a bassa concentrazione (LCPV) viene modellato per ottenere energia elettrica e preriscaldare acqua.

Le performance di un sistema CPV/T sono valutate anche da Chaoqing et al.. In questo caso, il sistema impiega come ottica un concentratore di Fresnel (Chaoqing et al., 2016). In (Yang e Zuo, 2015), invece, viene studiato un particolare sistema di raffreddamento, composto da micro canali, mentre in (Ceylan et al., 2016) viene progettato un sistema CPV/T con lo scopo di recuperare calore per produrre maggiore energia elettrica.

Meng et al. modificano le caratteristiche di un concentratore parabolico al fine di ottenere un generatore simultaneo di energia elettrica e termica (Meng et al., 2016). Da quanto si evince, risulta molto importante per ciascun sistema e condizione di funzionamento, valutare accuratamente sia le prestazioni termiche che quelle elettriche di un CPV/T.

Dalle analisi condotte, uno dei fattori più importanti nel modello della cella, come vedremo nel seguito, è la corretta valutazione della sua temperatura. Infatti, essa dipende dal fattore di concentrazione ed incide sulle prestazioni termiche ed elettriche. In tal senso è fondamentale, quando ci sono sistemi di raffreddamento attivi, valutare la temperatura del fluido termico – vettore nel CPV/T. Tali valutazioni possono essere fatte sia teoricamente che sperimentalmente. Ad esempio, in (Imtiaz Hussain e Lee, 2015), uno studio numerico e sperimentale viene sviluppato su un collettore di tipo U – shaped per un sistema CPV/T. In questo caso, viene scelta la

migliore portata volumetrica del fluido refrigerante al fine di massimizzare sia l'output elettrico che quello termico (Imtiaz Hussain e Lee, 2015).

Anche le reti neurali possono essere impiegate per la valutazione delle performance di un modulo a concentrazione. Ad esempio Almonacid et al. hanno impiegato una rete per la valutazione dell'energia elettrica di un modulo con alto fattore C, utilizzando come variabili principali la temperatura della cella e la radiazione diretta (Almonacid et al., 2015). Sempre considerando sistemi con raffreddamento attivo, Kerzman e Schaefer hanno sviluppato un concentratore lineare con fluido termovettore che asporta calore alle celle (Kerzman e Schaefer, 2012). In (Natarajan et al., 2012), inoltre, un modello tridimensionale di scambio termico è presentato per l'analisi delle prestazioni di un CPV/T.

Pertanto, si può osservare come il recupero termico dipenda principalmente dalla valutazione della temperatura della cella, che non può essere analizzata per ogni condizione di esercizio (Rodrigo et al., 2014). Come detto, la temperatura della cella è fortemente legata al fattore di concentrazione (Calabrese et al., 2014); tali parametri influenzano molti valori del sistema CPV/T, come la corrente foto – generata (Or e Appelbaum, 2014). Dall'analisi presentata, si può evincere come molti siano i sistemi e molte le configurazioni possibili e gli strumenti di analisi.

In particolare, Sharaf ed Orhan hanno provato a fornire le principali linee guida per i sistemi CPV/T mostrando componenti e principali sistemi (Sharaf e Orhan, 2015 a).

Infine, vista la grande attenzione per lo studio di soluzioni per il recupero del calore, Jakhar et al. hanno revisionato tutte le principali tecnologie impiegate nei CPV/T. Anche in questo caso, i modelli analizzati presentano, scambiatori a tubi, micro canali, immersione diretta e scambi per convezione naturale (Jakhar et al., 2016).

1.6. Conclusioni preliminari

Lo studio dei sistemi a concentrazione è complesso e prevede la conoscenza di differenti modelli e strumenti di analisi. In questo Capitolo sono stati esaminati i principi base degli impianti a concentrazione, esaminando componenti, sistemi principali, studi di letteratura ed iniziando ad introdurre ai principali problemi. Nel Capitolo successivo, affronteremo le problematiche evidenziate iniziando a predisporre gli strumenti di risoluzione.

Capitolo 2: Problematiche, strumenti di risoluzione e definizione delle fasi di lavoro

2.1. Introduzione

Il presente lavoro ha come obiettivo la definizione, la modellazione teorico – sperimentale ed infine la gestione energetica di sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione. Nel capitolo precedente, si è cominciato ad analizzare il problema dei sistemi a concentrazione definendo:

- i principali componenti;
- le principali configurazioni;
- gli studi già presentati in letteratura.

. In realtà, dalla discussione presentata, si evince chiaramente come l'aspetto più critico di tale tipo di sistemi sia la mancata affermazione di un standard ben determinato.

Se da un lato quest'ultimo fattore potrebbe sembrare uno svantaggio per la corretta analisi di producibilità di tali sistemi, dall'altro si presenta come un'opportunità per vagliare le differenti possibili soluzioni.

Sostanzialmente, risulta evidente che per una corretta definizione di un sistema a concentrazione sia fondamentale stabilire il tipo di impiego e definire tutti gli elementi che lo compongono.

Tale fase risulta molto complessa in quanto deve tener conto delle problematiche legate ai singoli componenti, agli input ed agli output. In primo luogo, si deve definire un sistema a concentrazione, tuttavia la possibilità di tenere aperte soluzioni alternative, porta ad analizzare le problematiche di differenti configurazioni, con differenti componenti. In secondo luogo, la fase di modellazione degli input è fondamentale al fine di poter valutare le potenzialità di tali sistemi e dimensionarli a seconda delle

richieste. Infine, si necessita dell'impiego di accurati strumenti sia teorico che sperimentali per analizzare le prestazioni e caratterizzare gli impianti.

È fondamentale, sin da ora, chiarire che seppur si sia parlato di sistemi CPV e CPV/T, l'attenzione sarà principalmente focalizzata sui secondi per le loro potenzialità di ottenere vettori energetici differenti. Infatti, come visto, la principale differenza risiede nella definizione di un sistema di raffreddamento attivo tale da consentire la produzione contemporanea di energia elettrica e termica. In questo senso, definiamo un sistema cogenerativo. Tale opportunità, va vagliata attentamente, per comprendere i problemi ad essa legata e le soluzioni adottabili.

In questo capitolo pertanto, definiremo le principali problematiche dei sistemi a concentrazione che si vogliono modellare, analizzando ciascuna fase ed introdurremo lo schema seguito nel lavoro per la risoluzione teorico – sperimentale di tutti gli aspetti critici.

2.2. L'opportunità di cogenerazione

Come analizzeremo nei paragrafi successivi, la concentrazione della luce solare porta ad incrementi notevoli della temperatura delle celle.

Tale problematica, legata essenzialmente al grande ammontare di energia che confluisce sulle celle e che, principalmente per effetto Joule, conduce all'aumento della temperatura delle stesse, permette di aprire il campo ad un'opportunità interessante, quella della cogenerazione. Infatti, se da un lato l'elevata temperatura ha come risultato la riduzione dell'efficienza della cella, facendo perdere, quasi completamente, tutti i vantaggi connessi alla concentrazione solare, dall'altro essa costituisce una fonte per il recupero dell'energia termica.

Si può osservare, si da ora, come tale opportunità richieda:

1. Conoscenza del funzionamento delle celle;
2. Caratterizzazione delle celle solari;
3. Valutazione della temperatura delle celle;
4. Studio dei sistemi di recupero del calore e definizione di modelli per l'analisi.

Senza voler entrare già nello specifico di tutte le problematiche da analizzare, si comprende come l'analisi di un sistema termo – fotovoltaico, preveda una serie di analisi supplementari rispetto ai semplici sistemi CPV.

In generale, come visto, si possono utilizzare sistemi di raffreddamento attivo, sia ad aria in moto forzato o con flusso di fluido all'interno di un canale che asporta il calore, oppure un sistema di raffreddamento passivo, mettendo delle alette sul retro della cella, al fine di raffreddare mediante convezione naturale.

Capitolo 2

Anziché disperdere il calore tramite un semplice raffreddamento, l'idea alla base dei CPV/T è di tramutare un prodotto negativo della concentrazione in un qualcosa di positivo. Infatti, l'utilizzo di tale calore può essere dei più svariati, sia in ambito cogenerativo che tri – generativo.

In Figura II.1, con riferimento ad un'utenza residenziale, si riporta uno schema concettuale di sistema termo – fotovoltaico a concentrazione con raffreddamento attivo delle celle e conseguente utilizzo del calore asportato.

Si può pensare di utilizzare l'energia termica per usi igienico sanitari e parte del riscaldamento nel corso dell'anno, oppure, nell'ipotesi di tri – generazione, utilizzare l'energia termica per alimentare pompe di calore ad assorbimento per la generazione di energia frigorifera.

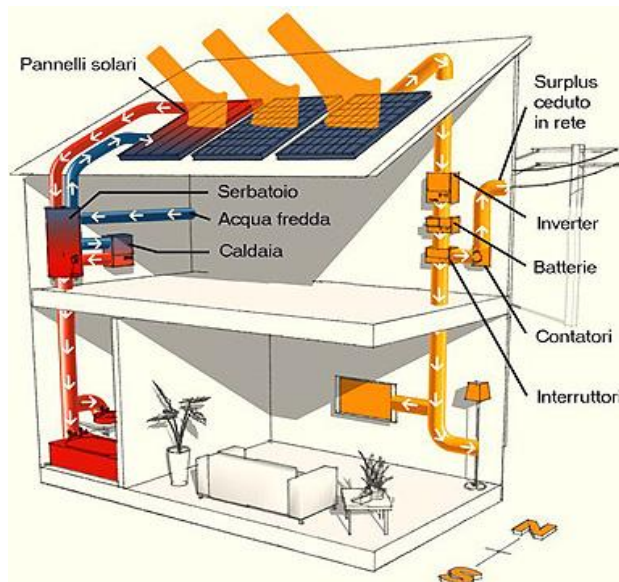


Figura II.1 Schema esemplificativo di un sistema cogenerativo per un'utenza domestica

2.3. Problematiche nella modellazione dei sistemi a concentrazione

La definizione di sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione richiede lo studio e la modellazione di differenti soluzioni. In questo senso, è necessario, visto la presenza di molteplici aspetti da modellare, riassumere le principali linee di sviluppo del lavoro.

I sistemi CPV/T si compongono di diverse parti e per la loro modellazione richiedono una definizione di ciascun componente ed un'analisi a 360° sia per quello che è l'input, sia per l'output sia per il funzionamento intrinseco del sistema. In questa sezione vengono esplicitati i principali problemi da affrontare, mentre nella parte finale del capitolo si

indicheranno gli strumenti da impiegare che, nel proseguo del lavoro, saranno descritti ed analizzati.

In primo luogo, per poter definire, modellare, dimensionare ed analizzare il funzionamento di un sistema CPV/T, va studiato l'input. Come detto, la presenza di elementi ottici, porta alla possibilità di lavorare solo con la componente diretta della radiazione. Nel capitolo precedente, sono stati analizzati i principali parametri legati alla posizione del Sole ed alla valutazione del potenziale solare. In questa fase, dettaglieremo il problema della previsione della radiazione solare diretta, in modo da comprendere le difficoltà da affrontare e predisporre i giusti strumenti di analisi.

In secondo luogo, parlando di sistemi a concentrazione, va studiato il livello di concentrazione. Infatti il fattore C è quello che principalmente discrimina un sistema a concentrazione e che ha riflessi su tutto il suo funzionamento, sia per la parte elettrica che quella termica. Pertanto va compreso, come esso incide sulle prestazioni e come possa essere valutato, una volta definito un sistema a concentrazione.

Un altro aspetto basilare nella trattazione di tali sistemi è legato alla principale componente che li compone, ovvero la cella solare. Essa costituisce il motore sia della parte elettrica che di quella termica. Pertanto, in questa sezione analizzeremo il suo funzionamento, mentre nel seguito si comprenderà come caratterizzarla e modellarla in modo da poter valutare gli output energetici ottenibili. Sempre legato alla cella, è la valutazione della sua temperatura. Infatti, mentre la comprensione del suo funzionamento ci permetterà di modellare l'output elettrico, la valutazione della sua temperatura consentirà di analizzare l'output termico. Come vedremo, la valutazione della T della cella rappresenta un problema complesso che potrà essere risolto solo tramite un modello che sfrutti analisi sia teoriche che sperimentali. Funzione del livello di concentrazione da raggiungere e dell'output desiderato sono sicuramente anche la scelta dell'ottica e della configurazione del sistema. In questo senso, l'analisi del capitolo precedente serve a poter impiegare le ottiche corrette sia nella fase di modellazione teoriche che in quella di valutazione sperimentale. Le ottiche tuttavia, sono molteplici e concorrono con la configurazione scelta a far sì che si raggiungano gli obiettivi in termini di prestazioni energetiche. Lo studio di tali parametri incide sui modelli di producibilità sia termica che elettrica. Solo tramite tali modelli è possibile comprendere come tali fattori incidano e quali siano le migliori soluzioni.

Parlando di CPV/T è chiaro che il sistema di raffreddamento attivo sia una delle parti fondamentali. Scelta la configurazione ed analizzate celle e fattore di concentrazione, è importante definire uno schema per lo scambio termico e modellarlo in modo da comprendere le prestazioni termiche ottenibili. Come vedremo, la fase di modellazione termica sarà approfondita, passando da un modello stazionario ad uno transitorio e definendo le potenzialità di differenti configurazioni.

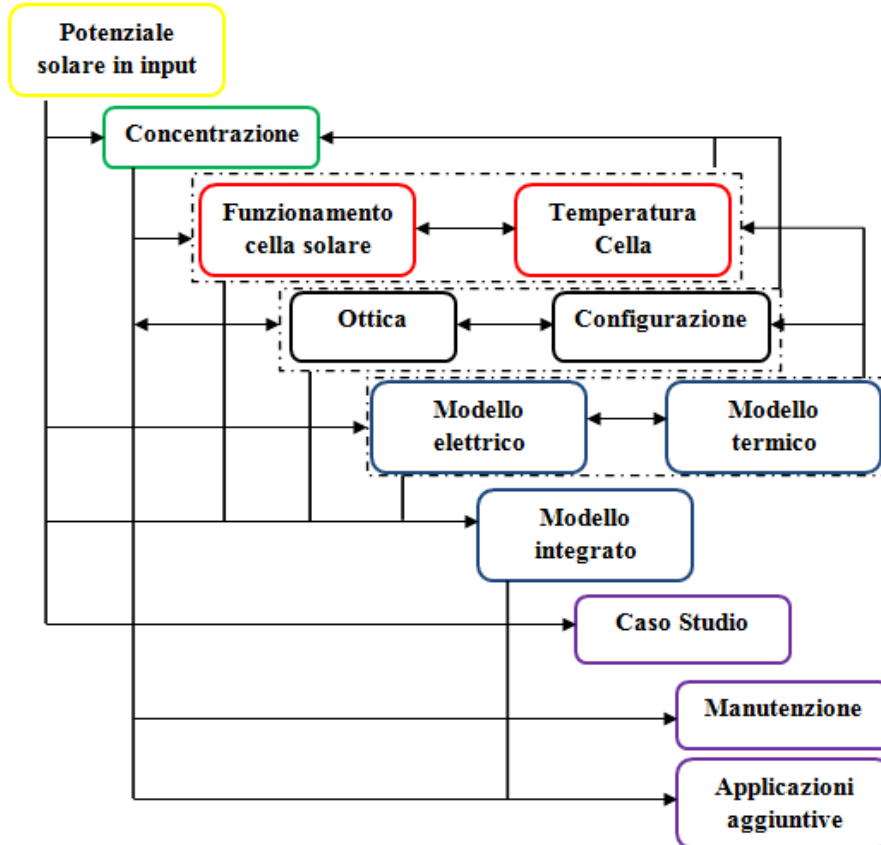


Figura II.2 *Principali problematiche e legami*

Un'approfondita fase di attività sperimentale accompagna gran parte delle fasi precedenti al fine di elaborare un modello univoco per il funzionamento del sistema e la valutazione dei suoi output energetici.

Infine, una volta messo a punto il modello, e realizzati alcuni prototipi sperimentali, si valuteranno le prestazioni in riferimento ad un'utenza residenziale media. In questo modo sarà possibile osservare lo schema di un eventuale impianto integrato ed analizzare, una volta definiti i carichi da soddisfare, le prestazioni del sistemi CPV/T. In quest'ottica, vanno valutate anche le eventuali necessità di manutenzione dell'impianto una volta in funzionamento, e la necessità di componenti aggiuntivi (serbatoi, caldaie di integrazione, scambiatori..) per il soddisfacimento delle richieste.

Riassumendo le problematiche da affrontare sono:

- Analisi del potenziale solare in input;

- Definizione e valutazione teorico sperimentale del fattore di concentrazione;
- Analisi del funzionamento della cella;
- Studio e valutazione della Temperatura della cella;
- Scelta di ottiche e configurazione;
- Modellazione elettrica del sistema;
- Studio di soluzioni per il raffreddamento attivo e modellazione termica del sistema;
- Funzionamento integrato del sistema e caso studio per un'utenza residenziale;
- Soluzioni di manutenzione ed applicazioni aggiuntive.

In Figura II.2 sono riportate le principali problematiche, evidenziando come ognuna sia interconnessa all'altra.

2.4. La problematica dell'analisi di radiazione globale e diretta

La valutazione del potenziale solare per l'analisi di un qualsiasi sistema basato su tale fonte costituisce una prima problematica da affrontare nella modellazione di un sistema a concentrazione. Infatti, solo una stima veritiera dell'input solare permette la definizione ed il dimensionamento del sistema, garantendo previsioni corrette di producibilità sia elettrica che termica.

L'energia raccolta da un sistema solare è direttamente proporzionale alla radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre, espressa in W/m^2 . Come visto, la radiazione globale può essere scomposta in varie componenti: diretta, diffusa e riflessa. Mentre la radiazione diretta colpisce una qualsiasi superficie con un unico e ben definito angolo di incidenza, quella diffusa incide su di essa con vari angoli. Quando la radiazione diretta non può colpire una superficie a causa della presenza di un ostacolo, l'area ombreggiata non si trova mai completamente oscurata, grazie al contributo della componente diffusa. Questa osservazione ha rilevanza tecnica nel caso di quei dispositivi fotovoltaici che possono operare anche in presenza di sola radiazione diffusa, come i pannelli tradizionali.

Tuttavia, per n sistema a concentrazione, la sola componente disponibile per la conversione di energia è quella diretta. Pertanto, risulta fondamentale definire un modello sia per la previsione della radiazione globale che per la sua componente diretta. Le proporzioni in cui la radiazione globale è suddivisa nelle sue componenti dipendono da:

- **condizioni meteorologiche**
- **inclinazione della superficie rispetto al piano orizzontale:** una superficie orizzontale riceve infatti la massima radiazione diffusa e

Capitolo 2

la minima riflessa e la componente riflessa aumenta al crescere dell'inclinazione;

- **presenza di superfici riflettenti.**

Al variare della località, inoltre, varia il rapporto fra la radiazione solare diffusa e quella totale, poiché all'aumentare dell'inclinazione della superficie di captazione diminuisce la componente diffusa e aumenta la componente riflessa. In conclusione, quindi, oltre ad una buona previsione del potenziale solare, c'è bisogno di predisporre anche il giusto sistema di inseguimento che consenta di massimizzare la raccolta della radiazione solare incidente.

Mentre, come visto, il sistema di inseguimento può essere facilmente installato, e valutato una volta definito il sistema a concentrazione, il potenziale solare costituisce una variabile di input determinante già nella fase di definizione.

La principale difficoltà è legata allo studio di un modello di previsione che sia il più accurato possibile, in quanto la radiazione diretta è fortemente influenzata dalle condizioni meteorologiche come ad esempio la nuvolosità.

Pertanto, l'impiego di soli modelli numerici basati su equazioni non può bastare. In tal senso, si analizzeranno le reti neurali artificiali per definire modelli di previsione della radiazione globale e diretta che impieghino anche valori raccolti sperimentalmente.

2.4.1. La variabilità della radiazione

Uno dei principali problemi da affrontare nella definizione dei sistemi a concentrazione, è l'ottimizzazione del dispositivo a partire da un input dato da una sorgente di energia avente un'elevata variabilità intrinseca. La variabilità della radiazione solare incidente sulla superficie terrestre è strettamente legata alle condizioni meteorologiche del cielo. Le condizioni di copertura del cielo, condizionano fortemente la stima della radiazione sia globale che diretta. Ad esempio, in una giornata nuvolosa, la radiazione è pressoché totalmente diffusa; in una giornata serena con clima secco, viceversa, predomina la componente diretta, che può arrivare fino al 90% della radiazione totale.

In Tabella II.1 vengono indicate stime orientative della percentuale di frazione diretta rispetto alla frazione globale a seconda del tipo di copertura del cielo.

Come si può osservare tali valori risultano abbastanza approssimativi e, comunque, risentono della conoscenza delle condizioni meteorologiche per il giorno in cui si vuole stimare la radiazione. Tale tipo di valutazione, quindi, non solo non fornisce una previsione accurata, ma è difficilmente applicabile per previsioni su orizzonti temporali diversi, in quanto si devono sempre conoscere le condizioni di copertura del cielo.

Tabella II.1 Percentuali di radiazione diretta e diffusa

	<i>Limpido</i>	<i>Sereno con poche nubi</i>	<i>Nuvoloso</i>	<i>Coperto con disco solare giallo</i>	<i>Coperto con disco solare bianco</i>	<i>Totale copertura</i>
<i>Radiazione globale (W/m²)</i>	950 - 1000	800 - 900	600 - 700	400 - 500	200 - 300	100
<i>Frazione diretta</i>	90%	80%	60%	40%	30%	0%
<i>Frazione diffusa</i>	10%	20%	40%	60%	70%	100%

Nel paragrafo seguente possiamo osservare un metodo numerico per la valutazione della radiazione globale e diretta. Tali metodi non consentono una precisa previsione della radiazione poiché approssimano molte variabili.

2.4.2. Metodo numerico per la valutazione della radiazione

globale e diretta

La componente diretta della radiazione globale rappresenta l'unica utile per la conversione di energia con sistemi a concentrazione. In questo paragrafo un metodo proposto per la sua valutazione (Renno e Petito, 2013), utilizzando grandezze astronomiche e formule.

La prima grandezza che viene calcolata è l'angolo di declinazione solare δ , definito nel Capitolo 1. Un altro parametro da tenere in considerazione è l'elevazione solare α , che indica l'angolo verticale che la retta tracciata dall'osservatore al Sole forma con il piano orizzontale. L'elevazione solare è espressa dalla seguente relazione:

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin(\delta) \times \sin(\varphi) + \cos(\delta) \times \cos(\varphi) \times \cos(HRA)] \quad (II.1)$$

dove φ è la latitudine del luogo scelto mentre HRA è l'angolo orario, che dipende essenzialmente dal giorno dell'anno e dalla longitudine della località di riferimento. L'elevazione solare è correlata all'angolo di zenit solare θ_z , che rappresenta il complemento a 90° dell'elevazione solare:

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad (II.2)$$

L'angolo orario HRA, invece, consente la conversione in gradi del tempo locale solare, LST, e definisce la posizione angolare assunta dal Sole durante

Capitolo 2

il suo movimento apparente nel cielo. Tale valore è espresso dalla seguente relazione:

$$\text{HRA} = 15^\circ \times (\text{LST} - 12) \quad (\text{II.3})$$

dove il valore di 15° indica l'angolo di rotazione della Terra in un'ora.

L'air mass, infine, definisce il percorso che effettua la luce nell'attraversamento dell'atmosfera in relazione al percorso che effettuerebbe se il Sole fosse allo zenit, il suo calcolo è stato mostrato nel Capitolo 1. Dato il suo valore si può ottenere la radiazione globale incidente in W/m^2 come:

$$G_g = G_0 \times [(1 - a \times h) \times 0,7^{\text{AM}^{0,678}} + a \times h] \quad (\text{II.4})$$

con G_0 che rappresenta la costante solare uguale a 1367 W/m^2 , a pari a 0.14 e h indica l'altitudine della località di riferimento espressa in km. La relazione appena esposta rappresenta la radiazione globale incidente su una superficie posta perpendicolarmente ai raggi solari non tenendo conto delle condizioni atmosferiche. Per l'ottenimento della radiazione diretta effettivamente sul modulo, si deve tener conto della variabilità delle condizioni atmosferiche, espressa tramite il fattore di copertura nuvolosa, e del meccanismo di movimentazione che permette al modulo di essere perpendicolare ai raggi solari. Il fattore di copertura nuvoloso valutato, pur basandosi su osservazioni trentennali, è espresso come media mensile, in ottavi, dove con 0 si intende cielo limpido e 8 cielo interamente coperto.

Tale informazione è fondamentale al fine di analizzare la riduzione di radiazione diretta in funzione della copertura del cielo media prevista, secondo le serie storiche analizzate. Si può quindi osservare che per la definizione della copertura nuvolosa si impiegano serie storiche, attraverso l'indice di copertura nuvolosa che, approssima le condizioni meteorologiche ma non dà una misura accurata delle effettive condizioni.

Attraverso il fattore di copertura espresso in scala decimale, si può definire la radiazione diretta:

$$G_{\text{dir}} = G_g \times c_n \quad (\text{II.5})$$

Il secondo aspetto che incide sulla valutazione della radiazione diretta è invece l'inclinazione del modulo. Per introdurre questa nuova fattore, bisogna considerare un altro parametro fondamentale: l'azimut solare ψ . L'azimut solare indica l'angolo compreso tra la posizione apparente del Sole ed il Nord che per convenzione è scelto come punto cardinale di riferimento. Tale grandezza è espressa analiticamente mediante:

$$\text{azim} = \cos^{-1} \left(\frac{\sin(\delta) \times \cos(\varphi) - \cos(\delta) \times \sin(\varphi) \times \cos(\text{HRA})}{\cos(\alpha)} \right) \quad (\text{II.6})$$

Il fattore azim è legato all'azimut solare dalle seguenti condizioni:

$$\psi = \text{azim se HRA} < 0; \quad \psi = 360^\circ - \text{azim se HRA} > 0 \quad (\text{II.7})$$

L'azimut relativo ai quattro punti cardinali è per definizione pari a:

$$\psi_N = 0^\circ; \quad \psi_E = 90^\circ; \quad \psi_S = 180^\circ; \quad \psi_W = 270^\circ \quad (\text{II.8})$$

La relazione che esprime la radiazione solare incidente su un modulo inclinato e orientato in maniera arbitraria è data da:

$$G_{\text{mod}} = G_{\text{dir}} \times [\cos(\alpha) \times \sin(\beta) \times \cos(\psi_r - \psi) + \sin(\alpha) \times \cos(\beta)] \quad (\text{II.9})$$

dove α è l'elevazione solare, β è l'inclinazione dei moduli rispetto alla superficie orizzontale, ψ è l'azimut solare e ψ_r è l'azimut della direzione verso cui sono orientati i moduli. Dal momento che la direzione ottimale è sempre quella rivolta all'equatore, nell'emisfero boreale la direzione ideale sarà Sud ($\psi_r = 180^\circ$) mentre nell'emisfero australe sarà Nord ($\psi_r = 0^\circ$).

Le espressioni analitiche appena impiegate permettono una valutazione approssimativa del potenziale solare, pertanto nel seguito, analizzeremo modelli alle reti neurali che sfruttano serie storiche e misure sperimentali ottenute tramite piranometri e piroeliometri.

2.5. Principi di funzionamento di una cella fotovoltaica

Il principio di funzionamento alla base delle celle solari è l'effetto fotovoltaico che rappresenta un processo in cui viene generata energia elettrica a partire da energia luminosa. Infatti, secondo la fisica quantistica, la luce è costituita da pacchetti di energia chiamati fotoni, la cui energia dipende solo dalla frequenza della luce. In un dispositivo fotovoltaico gli elettroni eccitati vengono prelevati grazie ad una differenza di potenziale e vanno ad alimentare un circuito esterno per compiere lavoro elettrico. L'efficienza del dispositivo fotovoltaico dipende dalla scelta del materiale assorbitore di luce e dal modo con cui questo è collegato al circuito esterno.

Le celle solari sono realizzate da strati di materiale semiconduttore. I principali materiali semiconduttori di interesse per questo tipo di applicazioni sono i solidi cristallini costituiti da elementi della colonna IV della tavola periodica (Si, Ge) o composti binari costituiti da elementi della III e della V colonna, per esempio l'arseniuro di gallio GaAs.

2.5.1 Modello a bande di energia

Il modello a bande di energia descrive la gamma di energie che ad un elettrone è consentito o proibito avere. Gli elettroni, in un solido allo stato fondamentale e a 0 Kelvin, riempiono gli stati elettronici a loro consentiti partendo dal livello energetico più basso, detto banda di valenza. La banda a

Capitolo 2

livello energetico superiore è la banda di conduzione a cui gli elettroni accedono assorbendo l'energia necessaria per superare la banda proibita o **energy gap**. I materiali sono classificabili in tre categorie rispetto all'intervallo di energie tra la banda di valenza e la banda di conduzione:

- conduttori, con banda proibita inesistente;
- semiconduttori, con banda proibita di circa 1.5 - 2eV (Si 1.12 eV);
- isolanti, con banda proibita maggiore di 4eV.

Considerando un energy gap pari ϵ_G , affinché un elettrone venga eccitato, passando, tramite l'assorbimento di un fotone, dalla banda di valenza a quella di conduzione, tale fotone deve avere almeno un'energia:

$$h\omega = \epsilon_G \quad (\text{II.10})$$

Dove h è la costante di Planck e ω è la frequenza della radiazione. Fotoni con energia minore non saranno in grado di eccitare gli elettroni e non verranno di conseguenza assorbiti ma semplicemente trasmessi o riflessi dal semiconduttore. Come mostrato in Figura II.3, gli elettroni eccitati in banda di conduzione iniziano a perdere la loro energia tanto velocemente quanto nei metalli tramite la generazione di fotoni.

Tuttavia quando gli elettroni raggiungono l'estremo inferiore ϵ_C della banda di conduzione, la perdita di energia in piccole porzioni tramite la generazione di fotoni non è più possibile poiché non sono più presenti stati elettronici ad energia minore (ma c'è la banda proibita). Per ritornare alla banda di valenza l'elettrone dovrebbe perdere interamente la sua energia di eccitazione ϵ_G in un unico step. Pertanto gli elettroni restano in banda di conduzione per un tempo relativamente lungo che consente al processo di conversione dell'energia degli elettroni in energia elettrica di aver luogo.

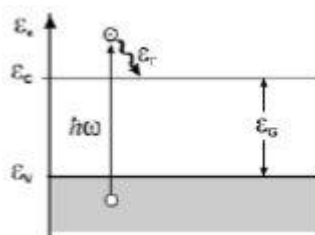


Figura II.3 Eccitazione di un elettrone in un semiconduttore

2.5.2. Effetto fotovoltaico e cella

L'effetto fotoelettrico prevede che un certo materiale emetta elettroni quando viene colpito dalla radiazione luminosa, la quale trasporta fotoni con una certa energia. I fotoni incidenti il materiale cedono la propria energia

liberare gli elettroni, in modo da convertire energia solare in energia elettrica. Illuminando una superficie di silicio, se i fotoni hanno energia superiore a quella del gap tra le bande, un elettrone della banda di valenza può assorbire il fotone, acquisirne l'energia e passare nella banda di conduzione, pronto a condurre una corrente elettrica. Perché questo succeda davvero è, però, necessario un motore che metta in movimento gli elettroni che hanno raggiunto la banda di conduzione. In caso contrario, dopo un certo tempo, gli elettroni ritornerebbero nella banda di valenza, rilasciando l'energia accumulata sotto forma di radiazione elettromagnetica. Questo motore è rappresentato da un campo elettrico. La giunzione p - n rappresenta l'ambiente favorevole all'ottenimento di un flusso di cariche previa installazione di un campo elettrico.

Una giunzione non è altro che l'unione di due volumi di semiconduttore, ognuno dei quali è stato separatamente lavorato introducendo delle impurità al suo interno (drogaggio), tali da far prevalere una quantità di cariche negative (elettroni) o positive (lacune). Una lacuna è in realtà una carica positiva del nucleo non compensata da un corrispondente elettrone.

Nel drogaggio di tipo n, alcuni atomi del reticolo cristallino del materiale semiconduttore sono sostituiti con atomi di materiali che hanno un elettrone di valenza in più (es. fosforo). Nel drogaggio di tipo p, si aggiungono atomi accettori di elettroni che liberano cariche positive (es. boro).

Si crea così una giunzione di tipo p - n, come indicato in Figura II.4, in cui gli elettroni della zona n diffondono nella zona p e dunque il silicio tipo n si carica positivamente mentre quello di tipo p si carica negativamente:

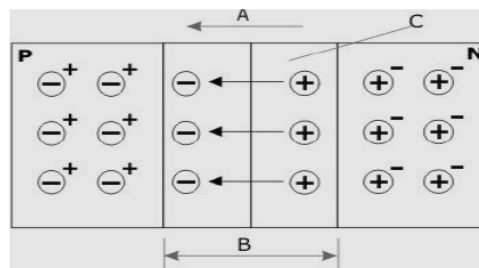


Figura II.4 Giunzione p - n

In questo modo, all'equilibrio, si ottiene un campo elettrico interno al sistema che tiene fortemente separate tra loro le zone contenenti le cariche mobili n e p.

La struttura basilare di cella solare consiste proprio nella giunzione tra un materiale semiconduttore di tipo n e un materiale semiconduttore di tipo p racchiusi tra due conduttori collegati in un circuito chiuso. La giunzione tra i due semiconduttori drogati n e p crea un campo elettrico interno in grado di separare le cariche elettriche generate dall'effetto fotovoltaico. Quando un fotone con energia sufficiente incide sulla cella si viene a creare una coppia

Capitolo 2

elettrone – lacuna. Gli elettroni procederanno verso il semiconduttore di tipo n e le lacune procederanno verso il semiconduttore di tipo p. Il flusso di cariche così generato diviene energia elettrica quando il dispositivo viene connesso a dei conduttori in un circuito chiuso, come mostrato in Figura II.5.

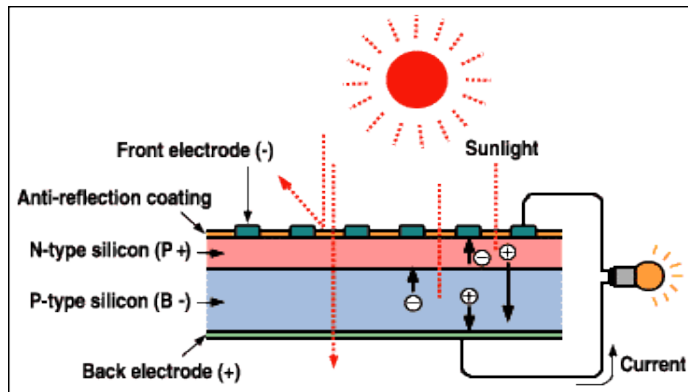


Figura II.5 Funzionamento di una cella fotovoltaica

Tra i vari semiconduttori che sono in grado di trasformare l'energia solare in energia elettrica il silicio risulta essere il più utilizzato. Di tutta l'energia che investe la cella solare sotto forma di radiazione luminosa, solo una parte viene convertita in energia elettrica disponibile ai suoi morsetti. L'efficienza di conversione per celle commerciali al silicio è in genere compresa tra il 13 ed il 17%. Come detto, esistono celle, come quelle multi giunzione, analizzate nel seguito, che permettono di ottenere valori molto superiori.

2.5.3. Caratteristica di una cella fotovoltaica

Dopo aver compreso i principi di funzionamento dal punto di vista della trasformazione dell'energia della cella è necessario approfondire il modello elettrico della cella e la sua caratterizzazione. In Figura II.6 è mostrato il modello circuitale equivalente per poter comprendere meglio il comportamento di una cella. Come visto in precedenza, i fotoni interagiscono con la giunzione facendo accumulare cariche negative da una parte e positive dall'altra. Quindi, applicando un connettore alle estremità della giunzione, le cariche tenderanno a riequilibrarsi.

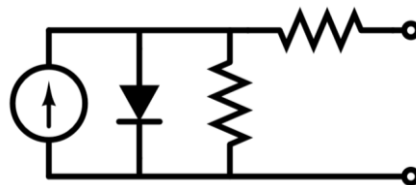


Figura II.6 Modello circuitale equivalente di una cella fotovoltaica

La cella ideale si può immaginare come un generatore di corrente con in parallelo un diodo. Il verso della corrente foto – generata è tale da polarizzare direttamente la giunzione. In Figura II.6 è illustrato il modello circuitale, completo di una resistenza che rappresenta l'impedenza d'uscita del sistema. Tale resistenza in genere è minima e viene accuratamente calcolata in fase di costruzione della cella. Applicando un carico variabile, la corrente tende a fluire verso lo stesso, fino a quando la caduta di potenziale sul carico non è uguale alla tensione di innesco del diodo. Le perdite sono state riassunte con una resistenza posta in parallelo al generatore.

Fino a quando la differenza di potenziale indotta sul carico dalla corrente generata dalla cella è inferiore alla tensione di innesco, il sistema si comporta come un generatore di corrente pressoché costante. Tenendo conto degli elementi sopra definiti, la corrente I che attraversa il circuito è data dall'equazione del diodo ideale di Shockley:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (II.11)$$

Dove I è l'intensità di corrente che scorre sul carico, I_{ph} è la corrente foto – generata, q è la carica elementare, k è la costante di Boltzmann, I_0 è la corrente di buio che è direttamente proporzionale alla superficie di giunzione tra la zona p e quella n, T è la temperatura assoluta sulla superficie di giunzione tra la zona p ed n, m è il coefficiente di idealità del diodo.

Nel caso in cui il carico è nullo, ovvero si è in condizioni di cortocircuito, si ottiene:

$$I = I_{ph} = I_{sc} \quad (II.12)$$

I_{sc} è definita corrente di corto circuito. Il caso opposto alle condizioni di cortocircuito si ha quando i terminali della cella sono scollegati (la resistenza tende all'infinito). In questa situazione la corrente di buio I_{dark} compensa completamente la corrente foto prodotta.

$$I_{dark} = I_{ph} \rightarrow I = 0 \quad (II.13)$$

Questo processo mantiene costante la differenza di potenziale tra il lato p ed il lato n ed è in prima approssimazione indipendente dalla quantità di portatori foto – generati. Questa tensione è un parametro caratteristico di ogni tipo di cella e viene chiamata tensione di circuito aperto comunemente indicata con V_{OC} .

Le condizioni di corto circuito o di circuito aperto rappresentano gli estremi di funzionamento della cella. Per poter sfruttare la potenza foto – prodotta occorre porsi in una condizione intermedia alle due.

La potenza prodotta da una cella può essere misurata a partire dalla tensione di esercizio che si determina ai capi del dispositivo moltiplicata per la corrente prodotta. Nelle condizioni elettriche estreme ($I=0$ e $I=I_{ph}$) la potenza che il dispositivo cella riesce a fornire ad un circuito esterno è nulla.

Capitolo 2

Il valore di corrente che rende massima la potenza prodotta da una cella fotovoltaica è detta corrente del punto di massima potenza ed è indicata con I_m . Analogamente viene definita la tensione che corrisponde alla corrente del punto di massima potenza $V_{max}=V(I_{max})$. P_m è la massima potenza che può essere ottenuta dalla cella.

L'efficienza η della cella, è determinata dal rapporto tra la potenza incidente e la massima potenza P_{max} prodotta dalla cella. È un indice che permette di valutare la bontà della cella nel convertire la luce solare in elettricità.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} V_{max}}{P_{in}} \quad (II.14)$$

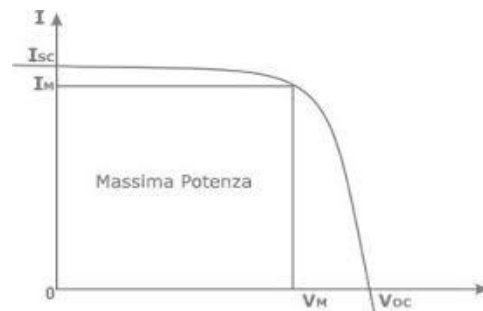


Figura II.7 Caratteristica $I - V$ di una cella fotovoltaica

In Figura II.7 è mostrata la caratteristica tensione – corrente di una cella solare illuminata. La curva caratteristica definisce tutti i punti di lavoro possibili della cella, fissate le condizioni di temperatura e intensità luminosa. La potenza è facilmente calcolabile misurando la tensione e la corrente del punto di lavoro. L'area del rettangolo $(0,0)$, $(V_m,0)$, (V_m, I_m) , $(0, I_m)$ è la massima potenza erogata dal sistema. Spostando il punto di lavoro si ottengono potenze diverse. Il punto di lavoro fluttua continuamente in modo imprevedibile, perché dipende sia dall'illuminazione che dalla temperatura, si pone, quindi, la necessità di inseguire il punto di massimo. Questo viene fatto attraverso un'elettronica opportuna, MPPT (maximum power point tracking).

Un altro parametro utile a descrivere il comportamento di una cella fotovoltaica è il fattore di riempimento FF (fill factor). Esso rappresenta un fattore di forma determinato dal rapporto tra la massima potenza P_m che può essere ottenuta dalla cella e la massima potenza idealmente ottenibile.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (II.15)$$

Bassi valori di fill factor possono essere legati alle non idealità della cella, come ad esempio la presenza di resistenze parassite:

- Resistenza in serie R_s ;
- Resistenza in parallelo (resistenza di shunt) R_{sh} .

La presenza di queste resistenze può essere attribuita a diversi fattori, legati alle successive lavorazioni eseguite durante la realizzazione della cella. La situazione ottimale per le prestazioni del dispositivo è raggiunta quando si ha un'elevata resistenza in parallelo ed una bassa resistenza in serie. Tenendo conto dei contributi resistivi sopra elencati, il modello circuitale di una cella fotovoltaica è meglio rappresentato dallo schema di Figura II.8.

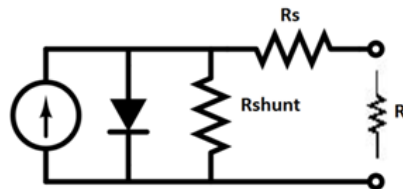


Figura II.8 Modello elettrico che tiene conto dei contributi resistivi

- La resistenza serie (R_s) tiene conto del contatto ohmico che vi è tra il metallo ed il semiconduttore mentre la resistenza di Shunt (R_{shunt}) è responsabile della corrente di leakage (elettroni e lacune che non si ricombinano) della cella. Da un punto di vista matematico è possibile modellare la relazione $I - V$ in questo modo:

$$I = I_{0,i} \left\{ \exp \left[\frac{e(V - IR_{s,i})}{m_i kT} \right] - 1 \right\} + \frac{V - IR_{s,i}}{R_{sh,i}} - I_{ph,i} \quad (II.16)$$

Dove i rappresenta il numero della sottocella (1=top, 2 è nel mezzo e 3 è in basso), e $I_{0,i}$ è il valore di carica, $I_{0,i}$ è la corrente di saturazione del diodo.

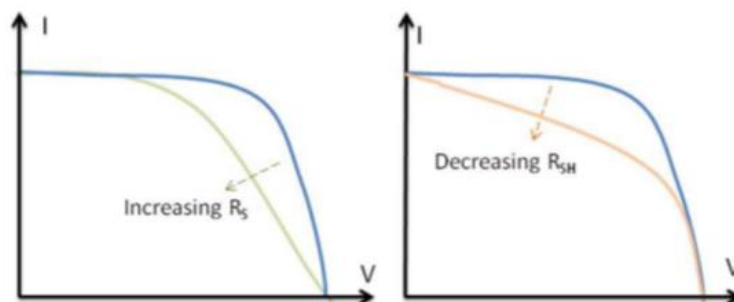


Figura II.9 Effetto della resistenza in serie e in parallelo

In Figura II.9 è rappresentato l'effetto di queste resistenze sulla caratteristica $I - V$ della cella. Un'elevata resistenza in serie fa crollare le prestazioni elettriche della cella per tensioni prossime alla V_{oc} , mentre una

Capitolo 2

piccola resistenza in parallelo condiziona tutto l'andamento della curva caratteristica.

2.5.4. La cella a tripla giunzione (MJ)

Le celle multi giunzione, seppur più costose e dal processo produttivo più complicato, hanno numerosi vantaggi che ben si sposano con le specifiche richieste dagli impianti a concentrazione:

- alta efficienza;
- minore degrado delle prestazioni con l'aumentare della temperatura;
- minore dimensione delle celle.

Per motivare, in maniera significativa, la maggiore efficienza delle celle multi giunzione bisogna considerare che, in una cella a singola giunzione (SJ) ideale con band gap caratteristico E_g , un fotone che incide sulla cella con energia $h \cdot \nu < E_g$ ha probabilità nulla di venire assorbito e non contribuisce al processo fotovoltaico. D'altra parte un fotone con energia $h \cdot \nu > E_g$ viene assorbito, ma solo una porzione di energia $E=E_g$, può essere convertita in energia elettrica, mentre l'energia in eccesso $h \cdot \nu - E_g$ viene dispersa sottoforma di calore. La massima efficienza si ha per fotoni con $h \cdot \nu = E_g$. Essendo lo spettro solare diffuso su un range 0–4 eV circa, inevitabilmente una cella a singola giunzione risulta meno efficiente di quanto lo sarebbe nel caso di luce monocromatica.

Stabilito che una cella a singola giunzione può assorbire solamente una porzione limitata dello spettro solare, a questo punto ci si può chiedere se esiste un numero ottimale di giunzioni e quanto sia sensato spingersi troppo oltre. Ammesso di trovare il giusto mix di semiconduttori, uno studio teorico di Henry ha dimostrato che, per un numero basso di giunzioni, l'incremento è significativo.

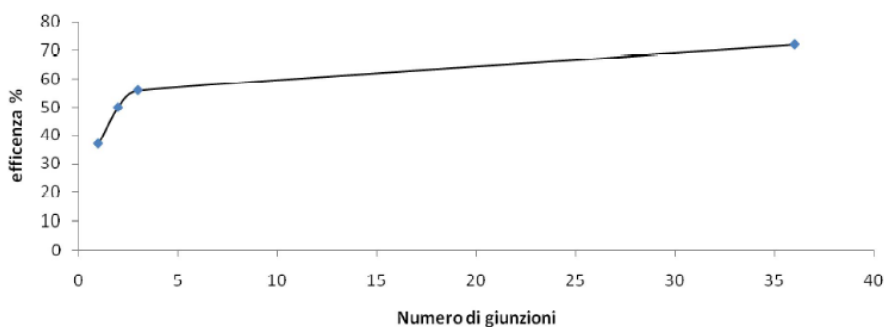


Figura II.10 Efficienza teorica in funzione del numero di giunzioni

La pendenza della curva In Figura II.10, infatti, è molto marcata nei primi punti e l'incremento è sempre più basso, aumentando il numero di giunzioni. Non vi è quindi un vantaggioso rapporto costo – beneficio per realizzare celle con un numero eccessivo di giunzioni. Così, la tripla giunzione sembra, al momento, un compromesso ragionevole.

Tale cella è data dalla sovrapposizione di una **cella top**, di una **cella middle** e di una **bottom** tale per cui si ha:

$$E_{\text{gap,top}} > E_{\text{gap,middle}} > E_{\text{gap,bottom}} \quad (\text{II.17})$$

Le caratteristiche di tensione e corrente per un'architettura di tale tipo sono date rispettivamente dalle relazioni seguenti, dove la tensione della cella a tripla giunzione risulta essere pari alla somma delle tensioni ai capi delle singole giunzioni mentre la corrente totale sarà pari alla corrente minima fra le giunzioni:

$$V = V_{\text{top}} + V_{\text{middle}} + V_{\text{bottom}} \quad (\text{II.18})$$

$$I = \min (I_{\text{top}}, I_{\text{middle}}, I_{\text{bottom}}) \quad (\text{II.19})$$

La realizzazione di celle a tripla giunzione prevede di far crescere le sottocelle una sopra l'altra, in modo da formare un dispositivo monolitico. Si scelgono, pertanto, una serie di band gap opportuni, in grado di assorbire l'energia che le giunzioni soprastanti non utilizzano, in questo caso il bandgap è via via decrescente.

Una cella monolitica necessita di un solo substrato, di contro la crescita di una struttura di questo tipo è molto più complessa rispetto alla realizzazione di più celle fisicamente separate. A causa del complicato processo di fabbricazione è impossibile inserire i contatti elettrici indipendenti per ogni giunzione senza compromettere il funzionamento del dispositivo e quindi i contatti metallici sono presenti solo sulla superficie della cella top e alla base della cella bottom. Pertanto le varie sottocelle risultano connesse in serie, e il dispositivo finale ha l'aspetto di una cella tradizionale, con un solo contatto positivo e un solo contatto negativo.

Nella soluzione di integrazione monolitica, la scelta dei band gap delle varie giunzioni e degli spessori delle sottocelle sono determinanti. In fase di costruzione, quindi, si sceglie in modo accurato la struttura delle bande: In questo senso, gli elementi del gruppo III-V evidenziano buone proprietà di “**band matching**”.

2.5.5. Problematiche legate alla cella ed alla sua temperatura

Il funzionamento della cella, soprattutto ragionando con celle MJ, è fondamentale per valutare la producibilità di un sistema a concentrazione.

In questo senso si necessita:

Capitolo 2

- Caratterizzazione delle celle impiegate;
- Analisi della producibilità elettrica;
- Stima della temperatura.

La temperatura della cella è un parametro fondamentale nei sistemi a concentrazione in quanto, oltre ad incidere sulla producibilità elettrica, costituisce il motore per lo scambio di calore e quindi per la produzione di energia termica. Osserviamo innanzitutto come la temperatura della cella incide sul suo funzionamento. In generale, vi è una dipendenza della tensione V_{OC} dalla temperatura, che influisce sul rendimento:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (II.20)$$

Il bandgap tende a diminuire con la temperatura secondo una legge del tipo:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T}{T+\beta} \quad (II.21)$$

Dove α e β sono delle costanti che dipendono dal semiconduttore considerato. Ricordando che la corrente di cortocircuito I_{SC} è legata alla V_{OC} della seguente equazione:

$$I_{sc} \approx I_0 \cdot e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{kT}} \approx BT^\zeta e^{\frac{-E_g(0)}{kT}} \cdot e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{kT}} \quad (II.22)$$

Dove si tiene conto della dipendenza della corrente di saturazione dalla temperatura, si ottiene in ultima analisi:

$$V_{oc}(T) = \frac{1}{q} E_g(0) - \frac{kT}{q} \ln \frac{B \cdot T^\zeta}{I_{sc}} \quad (II.23)$$

Da quest'ultima equazione si comprende come all'aumentare della temperatura sia normale aspettarsi un calo della tensione a circuito aperto.

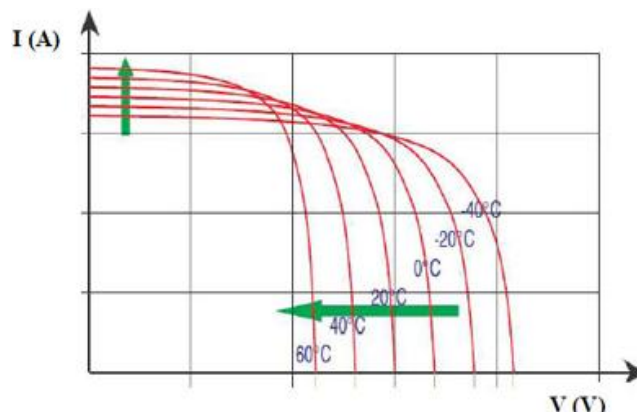


Figura II.11 Effetto temperatura sulla curva caratteristica della cella

Osservando la Figura II.11, si vede come la curva caratteristica di tensione della cella cambia in funzione della temperatura della stessa, con lo spostamento del punto di massima potenza e con la conseguente riduzione della potenza massima erogabile dalla cella. Questo è un problema così sentito che porta ad utilizzare un sistema attivo di raffreddamento, per non perdere i vantaggi della concentrazione e portare una sostanziale riduzione della temperatura della cella.

La valutazione della temperatura della cella è un aspetto fondamentale del lavoro. Come vedremo, esistono molti metodi sia analitici che sperimentali per la sua determinazione. Nello specifico si impiegherà un modello di Random Forest supportato da una serie di misure sperimentali sull'impianto allestito.

Per quanto riguarda il modello della cella, si seguirà sia la strada teorica che quella sperimentale. Nello specifico, la cella sarà caratterizzata sperimentalmente, valutando la sua producibilità, in concentrazione, tramite apposite strumentazioni. Sulla base delle misure, viene predisposto un modello elettrico per la valutazione della producibilità di un sistema a concentrazione. La valutazione della temperatura della cella, come detto, ha influenza anche sull'energia termica, quindi avrà riflesso anche sul modello di scambio termico. Infine, il modello della cella e la sua temperatura sono importanti per la valutazione di problematiche legate alla manutenzione degli impianti.

2.6. Le problematiche legate al livello di concentrazione

Il fattore di concentrazione, come detto, è il parametro più importante nella definizione di tali tipi di sistemi. Esso gioca un duplice ruolo:

- Diretto (nella produzione di energia);
- Indiretto (nel funzionamento dell'impianto).

In modo diretto esso condiziona la corrente foto – generata. Infatti, se la luce viene concentrata di X volte ci si aspetta che la corrente:

$$I_{sc}(X) = X \cdot I_{sc} \quad (II.24)$$

dato che il numero di fotoni aumenta linearmente con la concentrazione. In questo senso, conoscendo le correnti di corto circuito senza e con concentrazione, il fattore C può essere valutato sperimentalmente.

Per quanto riguarda il ruolo indiretto, esso ha riflesso sulla tensione di circuito aperto, quindi sul rendimento, ma anche sulla temperatura.

Si deve considerare, per una sola giunzione, che l'aumento della concentrazione, determina un ΔV_{OC} positivo, quindi per n giunzioni l'aumento sarà n volte maggiore. In riferimento alla singola giunzione e per

Capitolo 2

un aumento di concentrazione di un fattore X l'incremento della tensione di circuito aperto è:

$$V_{oc}(X) = V_{oc}(1) + \frac{kT}{q} \ln X \quad (\text{II.25})$$

Quindi ci si aspetta un leggero aumento della tensione a circuito aperto con la concentrazione. Pertanto, la curva caratteristica al variare della radiazione incidente assume una certa forma, come mostrato in Figura II.12.

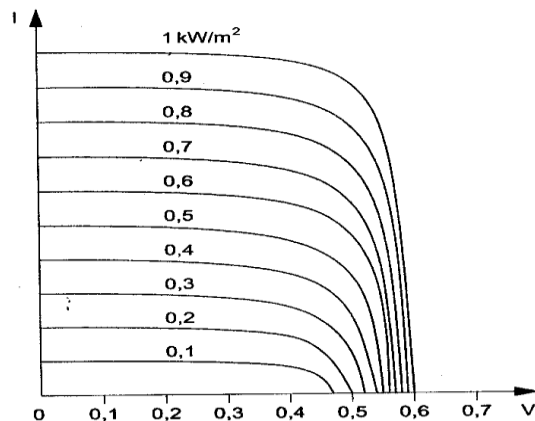


Figura II.12 Curva caratteristica $I - V$ al variare dell'irraggiamento

L'aumento della concentrazione ha riflessi quindi anche sul rendimento della cella. Per risolvere tale problematica, sarà caratterizzato il fattore C sperimentalmente, una volta scelte ottiche e configurazioni. Inoltre per osservare il suo impatto sia diretto che indiretto sarà introdotto un modello di producibilità elettrica e termica di tipo teorico – sperimentale.

È interessante notare come l'aumento della concentrazione genera due fenomeni contrapposti:

- Aumento della temperatura della cella;
- Aumento della tensione di circuito aperto e della corrente foto – generata.

In realtà, l'aumento della temperatura e la maggiore resistenza delle celle a tripla giunzione a tale effetto, costituiscono la chiave per lo sviluppo di un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione.

2.7. Problematiche legate all'ottica ed alla configurazione

La scelta dell'ottica e della configurazione di un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione, come mostrato in Figura II.1, ha riflessi su

molti aspetti. In primo luogo, l'ottica impiegata incide sulla concentrazione ottenibile. Inoltre, il tipo di configurazione, può far variare la scelta dell'ottica ed ha riflessi sia sulla producibilità che sull'ingombro complessivo del sistema.

Ad esempio, con uno schema di tipo point – focus, ogni cella ha un'ottica dedicata e quindi aumenta l'ingombro. Dall'altro lato tuttavia, in questo caso la concentrazione ottenibile è maggiore e quindi anche la producibilità, almeno quella elettrica. Infatti, dal punto di vista termico, con una configurazione point – focus, i punti caldi (le celle) sono più distanti e quindi l'energia termica prodotta risulta minore. Uno schema line – focus, invece, porta a concentrazioni minori, ma avvicina le masse termiche, migliorando lo scambio.

Le ottiche possono produrre inoltre problemi quali l'aberrazione cromatica, tipica delle lenti. Infatti, per celle a tripla giunzione, l'illuminazione deve essere molto uniforme. E' evidente, quindi, che un'eventuale dispersione della luce da parte del concentratore possa creare uno sbilanciamento delle giunzioni, cioè la distribuzione delle correnti sarebbe non omogenea. In questo senso, l'impiego di ottiche secondarie può essere una soluzione interessante. Ottiche riflettive, invece, richiedono, soprattutto sperimentalmente, maggiore precisione nella definizione dell'impianto e lavorazioni maggiori per quanto riguarda la riflettività.

Quindi sia ottiche che configurazioni rappresentano problematiche chiave sia nella definizione dell'impianto che nel suo funzionamento.

La loro analisi viene condotta, vagliando sia sperimentalmente che teoricamente differenti soluzioni. In questo senso, si valuteranno sia ottiche rifrattive (lenti) e riflettive (specchi) che configurazioni point e line – focus. Ciò conduce a modelli elettrici e termici specifici, nonché allo sviluppo di diversi prototipi.

2.8. Flow – chart del lavoro e strumenti di analisi

L'esposizione delle principali problematiche nella definizione, modellazione ed analisi di un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione, riportata nelle sezioni precedenti, ci permette di riassumere le fasi da affrontare nel lavoro, evidenziando gli strumenti teorico – sperimentali da impiegare.

In primo luogo, come visto, basarsi su semplici equazioni numeriche per la valutazione della radiazione solare globale e diretta, costituisce un limite al nostro modello in quanto potrebbe sovrastimare o sottostimare il potenziale solare. Infatti, la radiazione solare è soggetta a molti fattori esterni quali condizioni meteorologiche e climatiche. Ad esempio, la nuvolosità rappresenta una variabile che incide fortemente sulla previsione della radiazione diretta. Pertanto, nel seguito si dettaglieranno dei modelli specifici per la previsione della radiazione. Nello specifico si impiegheranno

Capitolo 2

le reti neurali artificiali, sfruttando sia dati di database che misure sperimentali raccolte sul campo. Quindi il problema dell'input viene risolto per mezzo dell'uso di modelli teorici alla reti neurali e di campagne di misura sperimentali.

Il fattore di concentrazione rappresenta, forse, il parametro con maggiore influenza su tutte le fasi di definizione e modellazione del sistema CPV/T. In questo senso, una volta compreso che dipende sia dalla configurazione che dall'ottica e che ha ripercussioni su tutti i modelli, solo una sua definizione sperimentale può permettere una sua corretta valutazione. Pertanto, il fattore di concentrazione, che funge da parametro in tutti i modelli che descriveremo, verrà valutato attraverso un'analisi di tipo sperimentale oltre che teorica.

Il funzionamento della cella, descritto nelle sezioni precedenti, costituisce una problematica che ha ripercussioni sia sull'output elettrico che quello termico. Dal punto di vista elettrico, in base ai rendimenti ed alla corrente foto – generata, si può conoscere la producibilità elettrica e dimensionare l'impianto. In questo senso, l'analisi della cella sarà affrontata tramite un modello teorico per la valutazione dell'output e tramite una fase sperimentale per la caratterizzazione della stessa. Come dicevamo, la cella ha ripercussioni anche sull'output termico. Nello specifico, come visto, le principali difficoltà sono legate alla valutazione della sua temperatura. In questo senso, la temperatura della cella sarà valutata tramite campagne di misura sperimentali e predisponendo dei modelli come quelli di Random Forest.

La configurazione e l'ottica hanno forte impatto sulla concentrazione e sulla producibilità, pertanto variando entrambi i parametri sarà valutata la loro incidenza sul sistema e la sua producibilità. Pertanto, attraverso dei modelli sia termici che elettrici si valuterà il loro impatto sulle prestazioni del sistema. Inoltre, attraverso una fase sperimentale saranno allestiti due impianti sperimentali con ottiche e configurazioni diverse.

La modellazione elettrica e termica, permettono di chiarire il problema della valutazione della producibilità dell'impianto. Inoltre, tramite un modello transitorio comparativo, si analizzerà lo scambio termico con differenti configurazioni.

Infine, nell'ottica di rispondere alle esigenze di un'utenza residenziale, sarà dimensionato un sistema a concentrazione, valutando la rispondenza dei carichi con l'output prodotto. Nello specifico, si predisporrà un modello integrato di funzionamento dell'impianto, che analizza anche eventuali necessità di manutenzione. Sulla base di quanto modellato sia teoricamente che sperimentalmente si osserveranno alcune applicazioni aggiuntive.

In Figura II.13 possiamo osservare il flow chart in cui sono descritte le varie fasi in cui si articola il lavoro, osservando le problematiche alle quali si risponde.

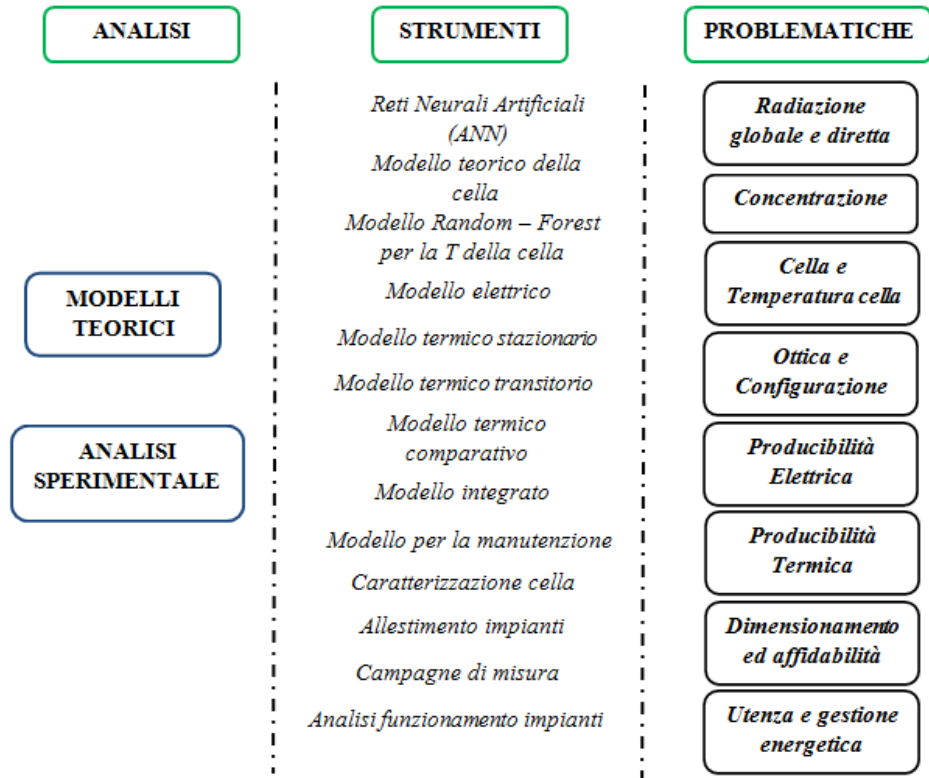


Figura II.13 Fasi del lavoro con strumenti e problematiche

Capitolo 3: Modelli di reti neurali artificiali per la previsione della radiazione diretta e globale

3.1. Introduzione al problema

Le tecnologie basate sulle fonti rinnovabili giocano un ruolo rilevante nel settore della produzione di energia. Il loro impatto è divenuto sempre più considerevole in merito al soddisfacimento delle richieste energetiche di utenze domestiche ed industriali (Sueyoshi e Goto, 2014). L'energia solare, nello specifico, è riconosciuta come la principale fonte rinnovabile in quanto rappresenta una risorsa facilmente accessibile e disponibile, in buona misura, in tutto il mondo (Nixon et al., 2013). L'energia solare può essere sfruttata attraverso differenti sistemi, sia fotovoltaici che termici, al fine di bilanciare la richiesta energetica delle varie nazioni, ridurre l'inquinamento ambientale, progettare e dimensionare sistemi integrati.

La previsione della radiazione solare rappresenta un aspetto basilare nella valutazione delle performance di un sistema solare (Wild et al., 2015), in particolare quando devono essere soddisfatte le richieste di differenti tipologie di utenti (Meade e Islam, 2015). Come descritto nei capitoli precedenti, la luce solare presenta differenti componenti; le principali sono la radiazione diretta e quella diffusa. Tuttavia nelle valutazioni dell'energia solare, si considera principalmente la previsione della radiazione globale per un luogo specifico, senza tener conto dei differenti contributi delle sue componenti. Pertanto, sebbene la maggior parte delle applicazioni rinnovabili, basate sull'energia solare, adotti come fonte principale la radiazione globale, i sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione richiedono un'accurata valutazione della componente diretta. In questo senso, la disponibilità di dati sulla radiazione solare e le sue componenti, può giocare un ruolo strategico nella valutazione dei sistemi solari (Qazi et al.,

2015). Generalmente, differenti apparati di misura sono impiegati al fine di rilevare l'ammontare della radiazione solare, come ad esempio piranometri, solarimetri e piroeliometri.

La variabilità della radiazione solare e l'indisponibilità di stazioni di misura per ciascun luogo, rendono necessario la predisposizione di accurati modelli di previsione che tengano conto di molteplici variabili. Ciò diviene ancor più importante quando bisogna considerare le specifiche componenti della radiazione, in particolar modo quella diretta. Quindi, al fine di garantire un corretto dimensionamento, ottimizzazione e controllo di un sistema solare integrato, risulta fondamentale impiegare strumenti di previsione capaci di fornire una valutazione della radiazione e delle sue componenti al variare dell'intervallo temporale considerato. In questo senso, un'accurata valutazione del potenziale solare per differenti località risulta un fattore determinante per configurare un sistema solare.

La previsione della radiazione solare rappresenta un processo complesso poiché si basa su un fenomeno non lineare. Inoltre, tale tipo di analisi risulta condizionata da molteplici variabili come quelle meteorologiche, climatiche e radiometriche. Come descritto nelle sezioni precedenti, la previsione della radiazione solare e delle sue componenti rappresenta un passaggio chiave nella modellazione di sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione. In precedenza, si sono esaminati gli aspetti chiave della radiazione, prendendo in considerazione tutte le principali variabili che descrivono il problema. Nella realtà, quando ci si trova a dimensionare un sistema solare complesso come quelli a concentrazione, le stime di producibilità sono fondamentali e devono basarsi su previsioni quanto più attinenti alla realtà. La radiazione solare può essere descritta da modelli fisici ed empirici, tuttavia le valutazioni ottenibili risultano globali e con un arco temporale che non fornisce misura di quanto accada ora per ora. Tra i vari modelli, quelli basati sulle reti neurali, possono fornire prestazioni eccellenti soprattutto nella risposta dinamica che si dà della previsione. In questo capitolo vengono esaminati i principali modelli per la definizione della radiazione solare, focalizzandosi principalmente sulle reti neurali. Viene, inoltre, presentata una dettagliata analisi della letteratura inerente i modelli per la radiazione globale e diretta, al fine di osservare quanto già fatto nel campo scientifico. Si mostra, in seguito, la metodologia seguita per lo sviluppo di differenti reti neurali per la previsione della radiazione. In particolare, una specifica procedura di analisi viene descritta al fine di ottenere valutazioni quanto più attinenti alla realtà. Per far questo, sono stati impiegati sia dati ottenuti da database nazionali sia valori monitorati durante campagne di misurazioni pluriennali.

L'obiettivo finale è quello di fornire, ora per ora e giorno per giorno, valori dell'irraggiamento globale e diretto utili alle successive fasi di dimensionamento e valutazione della producibilità energetica degli impianti a concentrazione. La metodologia seguita prevede principalmente lo

Capitolo 3

sviluppo di reti neurali a partire da differenti ipotesi di architettura. Pertanto diviene fondamentale studiare le reti neurali nel loro complesso ed analizzare quanto è già stato realizzato in letteratura. I risultati offerti dai modelli sviluppati vengono illustrati nel Capitolo 6 analizzando la loro importanza per un'efficace valutazione dei sistemi a concentrazione e fornendo un accurato confronto con le prestazioni dei modelli già presenti.

3.2. Generalità sui modelli per la previsione della radiazione

solare

La stima dell'energia solare viene tradizionalmente affrontata attraverso due principali tipologie di modelli (Zervas et al., 2008):

1. **Modelli empirici:** sono modelli basati su dati statistici osservati. Questi dati possono anche comprendere altri fattori che influenzano l'irraggiamento. I modelli empirici sono utili per la loro semplicità ma presentano bassa precisione.
2. **Modelli fisici:** sono basati su principi fisici espressi tramite equazioni. Questi modelli matematici forniscono un'elevata precisione ma richiedono numerosi dati in input e pertanto risultano, spesso, complessi.

Possiamo indicare anche un altro tipo di modello per il calcolo della radiazione solare, ovvero i modelli di decomposizione. Tali modelli provano a definire tutte le componenti della radiazione globale. Infine, un'ulteriore distinzione tra i modelli può essere considerando i modelli che predicano l'irraggiamento in condizioni di cielo sereno e quelli che considerano l'impatto della nuvolosità. In Figura III.1 possiamo osservare una suddivisione dei principali modelli per la previsione.

Spesso, risulta complesso tenere conto delle numerose variabili che entrano in gioco nel calcolo della radiazione solare senza complicare a dismisura il modello. Esiste, però, uno strumento che cerca di coniugare la semplicità dei modelli empirici con la precisione dei modelli fisici. Questo strumento è rappresentato dalle reti neurali artificiali (ANN) che, sovente, porta a soluzioni ottimali nelle applicazioni in cui bisogna apprendere una mappatura non lineare. Le principali caratteristiche delle reti neurali sono: capacità di apprendimento, generalizzazione, elaborazione parallela e resistenza agli errori (Azadeh et al., 2009). Pertanto le ANN vengono utilizzate per il riconoscimento di pattern, classificazione, approssimazione, previsione ed analisi dei dati, offrendo una valida alternativa alle tecniche più tradizionali in molti campi scientifici e non solo per la previsione della radiazione solare. Le reti neurali sono uno strumento di "soft – computing",

in quanto tali metodi sono basati non su tecniche analitiche, spesso molto difficili da sviluppare, ma bensì sul fatto di fornire soluzioni che gestiscono l'incertezza.

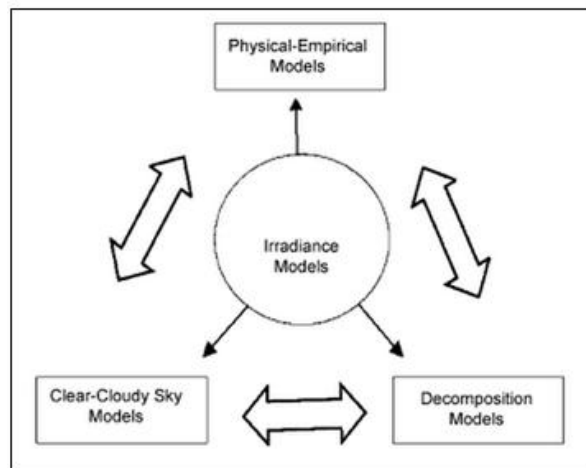


Figura III.1 *Principali modelli per la previsione della radiazione*

La capacità delle reti neurali di adattarsi a problemi non lineari sfruttando i dati a disposizione derivanti da campagne di misura pregresse, configura tale strumento come quello più efficace per l'intento modellistico configurato. Prima di osservare i principali modelli in letteratura ed analizzare la metodologia sviluppata in questo lavoro, osserviamo i principali aspetti salienti che descrivono le reti neurali.

3.3. Descrizione e principali caratteristiche delle reti neurali

artificiali

3.3.1. Principi generali

Le reti neurali artificiali sono dei sistemi di elaborazione dell'informazione che cercano di simulare il funzionamento del sistema nervoso biologico. La rete neurale cerca di riprodurre le proprietà e le caratteristiche funzionali dei neuroni biologici tramite costrutti matematici, dati e algoritmi.

Le reti neurali artificiali sono composte da un certo numero di unità processanti che operano in parallelo, i neuroni artificiali, e possono essere ripartite in più sottoinsiemi della rete, chiamati "strati". I neuroni di uno strato e quelli di un altro possono comunicare tra di loro attraverso delle connessioni pesate simili alle sinapsi biologiche. In questo modo, la rete

Capitolo 3

apprenderà, tramite la presentazione di una serie di input a cui corrisponderanno degli output, le relazioni che legano questi dati in maniera da fornire l'output a partire da input mai visti. In tal senso si realizza quello che è chiamato autoapprendimento.

A tal fine, occorre realizzare una struttura distribuita, massicciamente parallela, capace di generalizzare, apprendere e quindi di modificarsi in maniera conseguente. La struttura è costituita da un gruppo di interconnessioni di informazioni costituite da neuroni artificiali e processi che utilizzano un approccio di interconnessione di calcolo. Tipicamente, il neurone artificiale ha molti ingressi ed una sola uscita. Ogni ingresso ha associato un peso, che determina la conducibilità del canale di ingresso. L'attivazione del neurone è una funzione della somma pesata degli ingressi. I neuroni si possono vedere come nodi di una rete orientata che ricevono una combinazione di segnali e ne effettuano una trasformazione, tramite una funzione tipicamente non lineare, detta funzione di attivazione. Il modello matematico che si sta configurando è illustrato in Figura III.2.

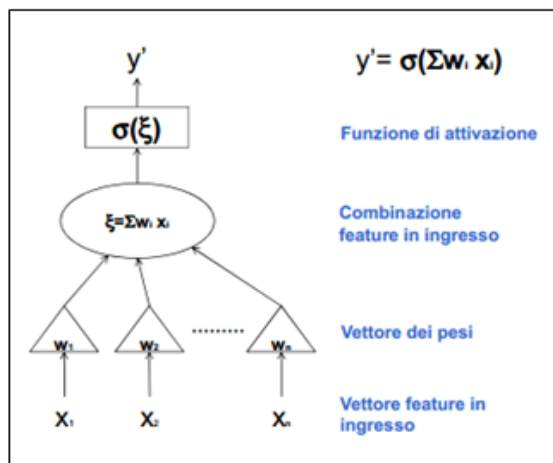


Figura III.2 Schema concettuale di funzionamento di una rete neurale

Questo modello è valido per un unico neurone, infatti ogni neurone presenta degli ingressi, dei pesi relativi ad ogni ingresso ed un'uscita. Tale schematizzazione, prevede che le reti neurali, attraverso l'acquisizione dell'esperienza su un certo fenomeno, possano conoscere i meccanismi che muovono quel fenomeno senza dover ricavare in maniera esplicita le relazioni matematiche. Ciò accade perché, a valle dell'addestramento, dato un input, esse forniranno un output che, a meno di un certo errore, ricalcherà l'output reale. In questo modo, possiamo considerare le reti neurali un modello tipo black – box, in quanto si possono ottenere delle uscite anche senza conoscere le dinamiche interne. Le attività necessarie al

raggiungimento del corretto funzionamento di una rete neurale possono essere suddivise in tre fasi:

1. **Raccolta dati:** la prima fase consiste nella raccolta di tutti i dati necessari all'addestramento del sistema. I campioni vanno raccolti con sensori di grandezze tangibili e valutati per ottenere gli output. E' importante che questi dati siano rappresentativi della realtà che si vuole modellare.
2. **Addestramento:** la seconda fase consiste nel fare apprendere alla rete, sulla base dell'acquisizione del training set, le relazioni esistenti tra i dati d'ingresso forniti dai sensori e le uscite corrispondenti. La risposta fornita dalla rete per ogni esempio viene confrontata con la risposta desiderata, si valuta la differenza (errore) fra le due e, in base a tale differenza, si aggiustano i pesi. Questo processo viene ripetuto sull'intero training set finché le uscite non producono un errore al di sotto di una soglia prestabilita.
3. **Validazione:** la terza fase ha lo scopo di provare e convalidare il sistema completo su un insieme di dati (test set) [62]. I dati di test devono essere diversi da quelli di training.

Una rete neurale è uno strumento che fa riferimento ad un certo schema generale ma è possibile considerare diverse tipologie di ANN. Queste ultime differiscono rispetto a tre elementi fondamentali che possono variare in funzione dello specifico campo di applicazione e degli obiettivi e caratteristiche che si vogliono raggiungere. Questi tre elementi sono:

1. **Architettura della ANN:** comprende il modo in cui i neuroni sono connessi tra loro;
2. **Paradigmi di apprendimento:** si fa riferimento al metodo con cui la rete apprende;
3. **Funzioni di attivazione:** definisce la maniera in cui si calcolano gli output di ciascun neurone.

3.3.2. Breve storia delle reti neurali

McCulloch e Pitts, nel 1943, sono stati i primi a formulare l'approccio cibernetico alla struttura del cervello elaborando il primo modello di rete neurale. Tale modello riproduceva le logiche di alcune semplici funzioni booleane.

Nel 1949 Hebb ricavò la prima regola di apprendimento applicabile alle reti neurali. Nel 1958 Rosenblatt introdusse un importante modello di rete neurale che venne chiamato perceptrone. Il perceptrone è una rete neurale costituita da dispositivi logici in grado di risolvere semplici problemi di riconoscimento di forme. Esso rappresentò un prototipo delle strutture che

Capitolo 3

vennero elaborate più avanti. Inoltre, il perceptrone determinò un decisivo progresso rispetto alla rete di McCulloch e Pitts in quanto i pesi sinaptici acquisirono variabilità, costituendo la capacità d'apprendimento della rete.

Nel 1969 Minsky e Papert mostrarono i limiti operativi delle semplici reti a due strati basate sul perceptrone dimostrando l'impossibilità di risolvere tutti quei problemi caratterizzati da separabilità lineare delle soluzioni. In seguito alle tesi di Minsky e Papert, il campo delle reti neurali fu abbandonato.

Nel 1974 Werbos riuscì a concepire il contesto matematico in cui prendono vita le MLP (multi-layers perceptron). Hopfield, nel 1982, si oppose alla confutazione di Minsky riaprendo degli spiragli per la ricerca in questo campo. Infatti, nel 1986, Rumelhart, Hinton e Williams, propongono l'algoritmo di back – propagation utilizzato per l'apprendimento delle MLP. Dopo gli anni '80 ricomincia il periodo di interesse e sviluppo in riferimento alle reti neurali.

3.3.3. Paradigmi di apprendimento

Per il raggiungimento del corretto funzionamento di una ANN è possibile trovare diversi paradigmi di apprendimento da applicare. Il corretto funzionamento della rete dipende dall'architettura, dalla funzione di attivazione e dai pesi. I primi due parametri sono fissati prima della fase di addestramento. Il compito dell'addestramento è quindi quello di aggiustare i pesi in modo che la rete produca le risposte desiderate. Avremo diverse tipologie di approcci all'apprendimento (Macera, 1990):

- **Apprendimento supervisionato:** E' il tipico approccio che si utilizza quando si dispone di dati di training. Si seguono in maniera canonica le tre fasi riportate. Inizialmente, vengono assegnati alla rete dei pesi casuali piccoli. Successivamente la rete viene addestrata mediante un opportuno algoritmo, che usa tali dati allo scopo di modificare i pesi in modo tale da minimizzare l'errore di previsione relativo all'insieme d'addestramento. Se l'addestramento ha successo, la rete impara a riconoscere la relazione incognita che lega le variabili d'ingresso a quelle d'uscita, ed è quindi in grado di fare previsioni anche laddove l'uscita non è nota a priori. Gli algoritmi di apprendimento supervisionato sono i più utilizzati e sono numerosi.
- **Apprendimento non supervisionato:** Non è associato ad un adeguato training set di dati. Ciò può avvenire perché le classi di dati possono essere non ottenibili manualmente o ottenibili solo in maniera imprecisa o lenta. In questo tipo di apprendimento, la rete tenta di organizzare i pattern del training set in cluster utilizzando opportune misure di similarità in modo tale che i gruppi siano

omogenei all'interno. Successivamente è necessario utilizzare la conoscenza a priori di un esperto per etichettare i cluster ottenuti al passo precedente al fine di rendere utilizzabile il classificatore. In questo caso l'addestramento si basa su algoritmi che modificano i pesi considerando solo dati di ingresso. La rete impara scoprendo le relazioni nascoste senza che nessuno agevoli il lavoro dall'esterno con i dati di output e perciò non c'è training.

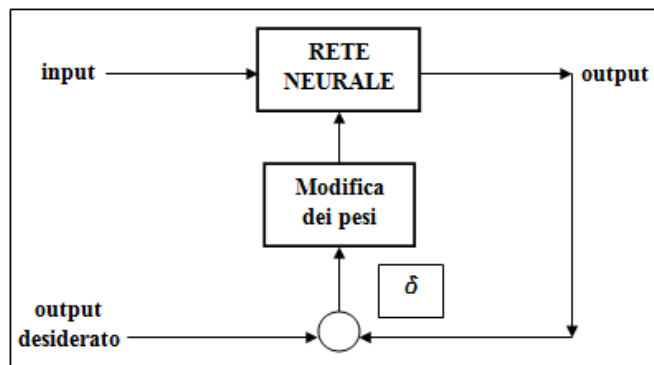


Figura III.3 Logica dell'apprendimento supervisionato

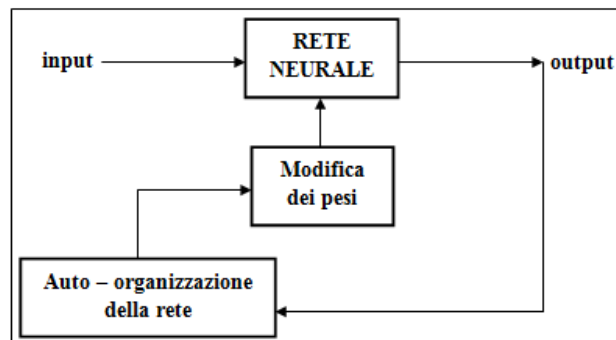


Figura III.4 Logica dell'apprendimento non supervisionato

- **Apprendimento per rinforzo:** In questo caso un algoritmo ha lo scopo di individuare alcune modalità d'interazione, a partire da un processo d'osservazione dell'ambiente esterno; ogni azione ha un impatto sull'ambiente, e l'ambiente produce una retroazione che guida l'algoritmo stesso nel processo d'apprendimento. Tale classe di problemi postula un agente, dotato di capacità di percezione, che esplora un ambiente nel quale intraprende una serie di azioni. L'ambiente fornisce in risposta un incentivo o un disincentivo, secondo i casi. Gli algoritmi per il reinforcement learning tentano di

Capitolo 3

determinare una politica tesa a massimizzare gli incentivi ricevuti dall'agente. L'apprendimento con rinforzo differisce da quello supervisionato poiché non sono mai presentate delle coppie input-output, né si procede alla correzione esplicita di azioni sub ottimali.

L'algoritmo che viene generalmente utilizzato per una rete multistrato è quello della back – propagation mentre per una rete costituita da uno strato è possibile utilizzare la delta rule o regola di Widrow-Hoff. In Figura III.5 possiamo osservare lo schema di rete per la delta rule.

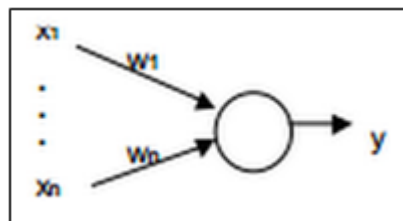


Figura III.5 Schema di un neurone che utilizza la delta rule

Sia $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)$ l'ingresso fornito al neurone. In questo caso, facciamo riferimento ad un unico neurone, ma se considerassimo più neuroni bisognerebbe, semplicemente, applicare lo stesso procedimento ai vari neuroni. Se t ed y sono, rispettivamente, l'uscita desiderata e l'uscita neurale, l'errore δ è dato da (Beale e Jackson, 1980):

$$\delta(n) = t(n) - y(n) \quad (\text{III.1})$$

Usando come funzione di errore lo scarto quadratico medio avremo che la funzione da minimizzare sarà:

$$\Delta(n) = \frac{1}{2} \delta^2(n) \quad (\text{III.2})$$

Per fare questo consideriamo che la delta rule stabilisca che la variazione del generico peso w_i è:

$$\Delta w_i = \eta \delta(n) x_i(n) \quad (\text{III.3})$$

Dove η viene definito learning rate e varia tra 0 e 1. Il learning rate determina la velocità di apprendimento del neurone. La delta rule modifica in maniera proporzionale all'errore solo i pesi delle connessioni che hanno contribuito all'errore (cioè che hanno $x_i \neq 0$). Il nuovo valore dei pesi sarà:

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \Delta w_i(n) \quad (\text{III.4})$$

Variando i pesi avrò in uscita dalla rete un diverso valore. Come ciò avviene lo si capisce guardando il modello generale di funzionamento di una ANN quando si effettua la combinazione delle feature in ingresso.

La back – propagation può essere definito come un metodo di addestramento che generalizza la regola delta per reti con funzioni di trasferimento non lineari. L'obiettivo della back – propagation è quello di minimizzare la seguente funzione dell'errore quadratico medio:

$$E = \sum_{c=1}^S \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} (d_{cj} - y_{cj})^2 \quad (\text{III.5})$$

In questa funzione si sommano, per tutti i pattern c , l'errore quadratico medio in uscita da ogni neurone j . Per determinare l'errore di un neurone di uscita si usano gli output forniti, mentre per un uscita di un neurone nascosto ciò non è possibile. È necessario, quindi, necessario retro – propagare l'errore. Per raggiungere lo scopo della back – propagation bisogna calcolare lo Jacobiano della funzione d'errore rispetto ai pesi. Questo calcolo serve per illustrare l'algoritmo di Levenberg-Marquardt (LM) che è stato utilizzato nei modelli sviluppati nel lavoro. Infatti, LM, è un modo con cui applicare la back – propagation. Bisogna calcolare lo Jacobiano, composto dalle seguenti derivate parziali:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{jk}} = \frac{\partial E}{\partial y_j} \frac{\partial y_j}{\partial P_j} \frac{\partial P_j}{\partial w_{jk}} \quad (\text{III.6})$$

Dove w_{jk} è il k -esimo peso del neurone j e P_j è il potenziale d'attivazione del neurone j . L'espressione è stata ricavata grazie alle derivate composte. Le tre derivate parziali saranno calcolate separatamente secondo queste espressioni:

$$\frac{\partial E}{\partial y_j} = \frac{\partial \frac{1}{2}(d_j - y_j)^2}{\partial y_j} \quad (\text{III.7})$$

$$\frac{\partial y_j}{\partial P_j} = \frac{\partial T(P_j)}{\partial P_j} \quad (\text{III.8})$$

$$\frac{\partial P_j}{\partial w_{jk}} = \frac{\partial \sum_{k=0}^m (w_{jk} z_k)}{\partial w_{jk}} \quad (\text{III.9})$$

z_k è l'uscita k -esima dello strato precedente ed m è il numero dei neuroni di tale strato. T è la funzione di attivazione dello strato considerato. Tali derivate possono essere svolte solo per lo strato di uscita in quanto d_j è incognito per strati intermedi. Per lo strato di uscita:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{jk}} = -(d_j - y_j) T'(P_j) z_k \quad (\text{III.10})$$

Per un nodo interno si ha:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ki}} = \frac{\partial E}{\partial z_k} \frac{\partial z_k}{\partial P_j} \frac{\partial P_j}{\partial w_{ki}} \quad (\text{III.11})$$

Capitolo 3

Retropropagando l'errore dello strato successivo, se j sono i neuroni successivi, si ha:

$$\frac{\partial E}{\partial z_k} = \sum_{j=0}^p \left[\frac{\partial E}{\partial y_j} \frac{\partial y_j}{\partial P_j} \frac{\partial P_j}{\partial z_k} \right] = \sum_{j=0}^p [-(d_j - y_j) T'(P_j) w_{jk}] \quad (\text{III.12})$$

Questi valori sono tutti noti e perciò abbiamo definito il calcolo dello Jacobiano per ogni strato della rete. In questo caso si osserva che la funzione sigmoide è molto utilizzata in queste reti perché la sua derivata è computazionalmente efficiente. Lo Jacobiano deve essere calcolato per ogni pattern in maniera da minimizzare la funzione dell'errore complessivo. Ciò può essere fatto tramite la modifica dei pesi, di ogni strato, che avverrà tramite l'algoritmo LM. L'algoritmo LM cerca di trarre il meglio dai due algoritmi di risoluzione di sistemi non lineari maggiormente utilizzati: gradient descent e il metodo Gauss-Newton. Considerando:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^t (e_i)^2 \quad (\text{III.13})$$

Dove e^n è l'errore rispetto all' n -esimo pattern. Supponiamo di volerci spostare nello spazio dei pesi trovando un punto in cui l'errore ha un valore minore. Chiamiamo il punto appena lasciato w_o , e il nuovo punto raggiunto w_n . Se lo spostamento effettuato è abbastanza piccolo possiamo effettuare uno sviluppo in serie di Taylor:

$$e(w_n) = e(w_o) + J(w_n - w_o) \quad (\text{III.14})$$

Sostituendo quest'equazione nella formula dell'errore si ha:

$$E = \frac{1}{2} \|e(w_o) + J(w_n - w_o)\|^2 \quad (\text{III.15})$$

Minimizzando l'errore derivando rispetto a w_n :

$$w_n = w_o - (J^T J)^{-1} J^T e(w_o) \quad (\text{III.16})$$

Questo tipo di approccio, che è quello di Gauss-Newton, può dare dei problemi poiché lo spostamento nello spazio dei pesi potrebbe diventare troppo grande e farebbe perdere di significato l'approssimazione fatta con Taylor. Quindi cercando di mantenere un passo abbastanza piccolo in ogni iterazione, possiamo introdurre una funzione d'errore modificata che risulta minimizzata:

$$E = \frac{1}{2} \|e(w_o) + J(w_n - w_o)\|^2 + \lambda \|w_n - w_o\|^2 \quad (\text{III.17})$$

$$w_n = w_o - (J^T J + I\lambda)^{-1} J^T e(w_o) \quad (\text{III.18})$$

Con λ vicino a zero si tende a Newton mentre con λ elevato si tenderà al gradient descent. Infatti, durante l'esecuzione dell'algoritmo il valore di λ

deve cambiare in maniera appropriata. Spesso si parte con un valore arbitrario di λ , spesso 0.1. Se dopo un'iterazione l'errore decresce si diminuisce λ di un fattore 10, al contrario se aumenta il parametro viene aumentato di 10 e riprova ad applicare la formula. Riassumendo:

1. Presentare alla rete tutti gli input, calcolare le uscite e l'errore quadratico;
2. Calcolare la matrice Jacobiana;
3. Calcolare w_n e l'errore quadratico;
 - Se l'errore è minore di quello in 1 ridurre λ , considerare $w_o=w_n$ e tornare ad 1;
 - Se l'errore è maggiore di quello in 1 incrementare λ e andare a 3.
4. L'algoritmo converge quando l'errore è sceso al di sotto di una certa soglia.

Questo algoritmo è particolarmente adatto in problemi di function fitting, come quello nei modelli successivi dell'elaborato. LM è il metodo più veloce per addestrare reti neurali feed – forward di dimensioni moderate (cioè contenenti fino a parecchie centinaia di pesi). Non sempre converge bene al minimo in quanto dipende dai pesi di partenza, dagli incrementi e dal tasso d'apprendimento.

3.3.4. Funzioni di attivazione

Le funzioni di attivazione $f(A)$ sono funzioni che correlano l'uscita di un neurone con il potenziale di attivazione, che è costituito dai pesi sinaptici dei collegamenti e dagli ingressi del neurone stesso:

$$f(A) = f(\sum_{i=0}^n x_i w_i) \tag{III.19}$$

Alcuni esempi di funzioni di attivazione sono i seguenti:

- **Funzione a soglia** (o a gradino): L'uscita che scaturisce dall'utilizzo di una funzione a soglia è la seguente:

$$y = f(A) = \begin{cases} 1 & \text{se } A \geq 0 \\ 0 & \text{se } A < 0 \end{cases} \tag{III.20}$$

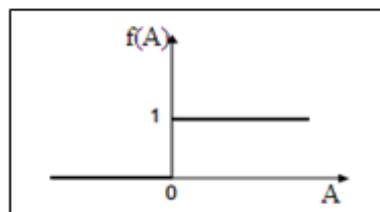


Figura III.6 Funzione di trasferimento a soglia

Capitolo 3

- **Funzione lineare:** La forma analitica della funzione lineare è la seguente:

$$y=f(A) = A [1] \quad (\text{III.21})$$

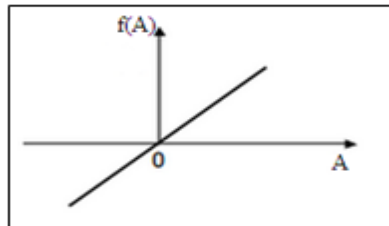


Figura III.7 Funzione di trasferimento lineare

- **Funzione sigmoide:** E' la funzione più usata ed è strettamente crescente con un bilanciamento tra un comportamento lineare e non lineare. Questa funzione è utilizzata soprattutto nelle reti in cui è necessario l'utilizzo dell'algorithm di back - propagation (ad esempio nelle MLP). La sua forma analitica è la seguente:

$$y = f(A) = \frac{1}{1+e^{-A}} \quad (\text{III.21})$$

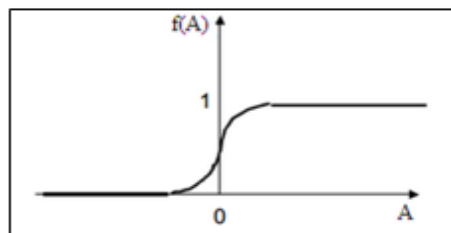


Figura III.8 Funzione di attivazione sigmoide

- **Funzione tangente iperbolica:** La sua forma analitica è la seguente:

$$y = f(A) = \tanh A = \frac{1-e^{-2A}}{1+e^{-2A}} \quad (\text{III.22})$$

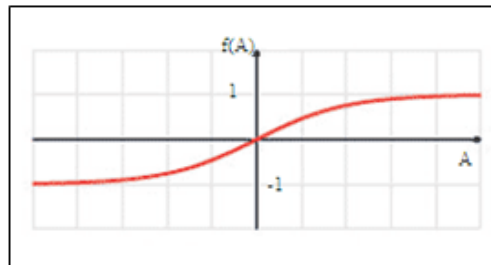


Figura III.9 Funzione di attivazione tangente iperbolica

E' vantaggioso utilizzare come funzione di attivazione la sigmoide o la tangente iperbolica in quanto le rispettive derivate consentono di semplificare in maniera significativa l'algoritmo di back – propagation.

3.3.5. Architettura di una rete neurale

L'architettura di una ANN è la modalità con cui vengono connessi i neuroni tra loro. Principalmente possiamo distinguere tra:

- reti feed – forward;
- reti feed – back.

Le reti feed – forward sono reti la cui rappresentazione, attraverso un grafo orientato, corrisponde ad un grafo aciclico diretto. In pratica, i collegamenti che partono da un neurone arrivano sempre ad un altro neurone posto all'interno di uno strato immediatamente successivo. Non ci sono connessioni di retroazione e non ci sono collegamenti tra i neuroni di uno stesso strato, ma ogni neurone è collegato a tutti i neuroni dello strato successivo (Bishop, 1995). In questo modo, tali reti, calcolano un risultato molto rapidamente in quanto non ci sono tempi di ritardo dovuti al fatto che i neuroni interagiscono con se stessi per sistemarsi in uno stato stabile. In queste reti i collegamenti sono numerosi e si passerà all'elaborazione, da parte dei neuroni dello strato successivo, solo dopo che tutti i neuroni dello stato precedente hanno comunicato il proprio output. Diversamente dalle reti feed – back, le reti feed – forward danno una risposta che è indipendente dallo stato precedente all'applicazione del segnale di ingresso. In un certo senso si può quindi dire che esse non hanno memoria del loro stato. In Figura III.10 è mostrato un esempio di rete feed – forward multistrato.

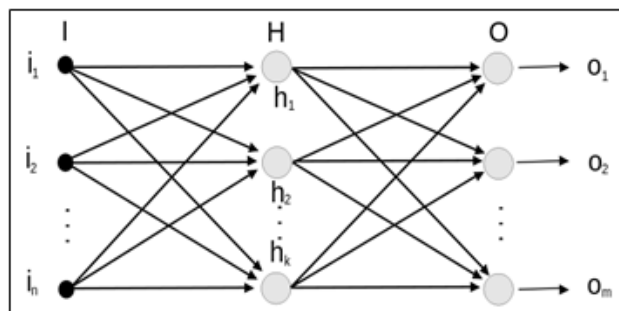


Figura III.10 Schema di una rete feed – forward multistrato

Le reti feed – back, invece, contengono cicli all'interno del grafo che le rappresenta. Ciò perché un collegamento che giunge ad un neurone può

Capitolo 3

essere partito anche da un altro neurone appartenente allo strato successivo oppure allo stesso del neurone d'arrivo. E' addirittura possibile che vi siano collegamenti retroazionati sul neurone da cui parte il collegamento stesso. Data la possibilità di avere numerose connessioni "retroazionanti", le reti feedback, partendo da uno stato iniziale, evolvono dinamicamente fino a raggiungere uno stato stabile, in seguito al quale la rete fornisce il risultato di uscita. Al contrario delle reti feed - forward le reti feed - back sono sistemi dinamici. Infatti quando si presenta una nuova configurazione del segnale di ingresso, le uscite dei neuroni vengono calcolate tenendo conto dei cammini di reazione. Questi contribuiscono a modificare gli ingressi dei neuroni il che conduce la rete ad assumere un nuovo stato.

E' possibile distinguere le ANN anche in funzione del numero di strati che sono presenti nella rete. Si possono avere reti non stratificate e reti stratificate. Nelle reti non stratificate abbiamo semplicemente un input layer e un unico strato di neuroni che ci forniranno l'output.

Le reti stratificate, invece, sono caratterizzate da una topologia che prevede tre classi di nodi:

1. I nodi di input hanno la funzione di inviare l'input a tutti i neuroni del livello successivo. Essi non compiono alcuna elaborazione.
2. I nodi nascosti ricevono gli input dai nodi dello strato precedente ed effettuano delle elaborazioni utili al calcolo dell'output. Questi nodi sono detti nascosti perché appartengono ad uno strato intermedio che non lavora direttamente con i dati forniti dall'esterno. Ognuno di essi ha in ingresso un bias term, così come i nodi di output.
3. I nodi di output ricevono gli input dai nodi nascosti e, dopo aver effettuato le opportune elaborazioni, offrono l'output desiderato.

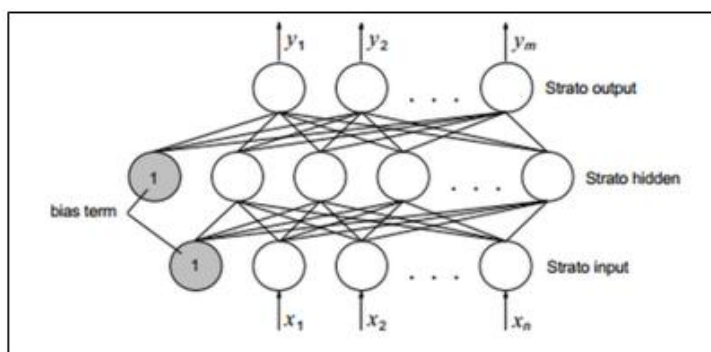


Figura III.11 Schema di una rete neurale stratificata

Pensando alle potenzialità delle reti multistrato si consideri che con un solo livello nascosto si può approssimare qualsiasi funzione continua

(Teorema di Cybenko) mentre con due livelli nascosti si possono approssimare tutte le funzioni che hanno discontinuità.

Descrivendo alcuni esempi di rete non possiamo non citare la rete perceptron. Il perceptrone è una rete neurale artificiale composta da un solo neurone avente più ingressi ed una sola uscita. Lo schema del perceptrone è rappresentato in Figura III.12.

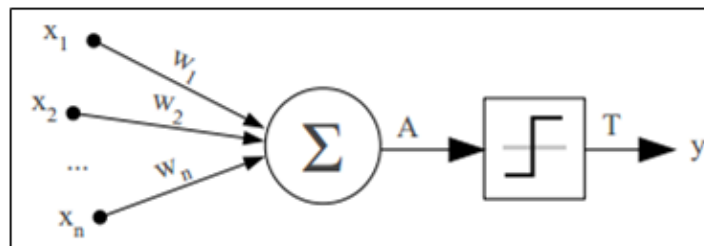


Figura III.12 Schema di una rete perceptron

Abbiamo x_1, x_2, \dots, x_n canali di ingresso associati a w_1, w_2, \dots, w_n pesi. I pesi sono numeri reali. L'uscita è calcolata applicando la funzione di attivazione alla somma pesata degli ingressi. Nel caso del perceptrone la funzione di attivazione è una funzione gradino T. Perciò si ha che:

$$y = T(A) = T(\sum_{i=1}^n x_i w_i - \theta) \tag{III.23}$$

Dove A rappresenta il risultato della somma pesata degli ingressi mentre θ rappresenta una soglia caratteristica del neurone. Possiamo considerare una modifica a questo modello interpretando il valore di soglia come il peso associato ad un ingresso aggiuntivo x_0 che ha valore pari a -1. Avremo quindi:

$$y = T(A) = T(\sum_{i=0}^n x_i w_i) \tag{III.24}$$

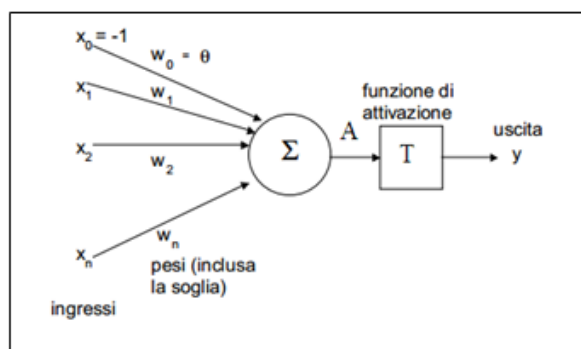


Figura III.13 Perceptrone con soglia valutata come peso

Spesso, invece di considerare la soglia, si considera l'opposto, il bias, che può quindi essere visto come il peso associato ad un ulteriore canale di

Capitolo 3

ingresso di valore costante pari a 1. La formula è la stessa. Il perceptrone si attiva quando il potenziale d'attivazione (A) è maggiore di zero altrimenti non si attiverà.

Questa rete neurale è un classificatore in grado di svolgere semplici problemi di separazione lineare. Infatti il potenziale di attivazione rappresenterà un iperpiano in \mathbb{R}^n che suddivide lo spazio degli ingressi in due semispazi distinti. L'iperpiano è rappresentato dalla seguente equazione:

$$\sum_{i=0}^n x_i w_i = x_0 w_0 + x_1 w_1 + \dots + x_n w_n = 0 \quad (\text{III.25})$$

Dove si ha che i pesi w_i sono dei coefficienti numerici. Definito l'iperpiano avremo che i punti caratterizzati dalle x_i coordinate saranno al di sopra dell'iperpiano se superano il potenziale d'attivazione, altrimenti saranno al di sotto. In questo modo è possibile utilizzare il perceptrone come separatore lineare delle più semplici logiche booleane. Questa rete funziona bene come separatore lineare per funzioni semplici. Per poter ovviare ai limiti delle reti a singolo strato si utilizzano le reti multistrato. Un esempio di rete multistrato statica feed – forward è la MLP (multi-layers perceptron).

Le MLP rappresentano perceptron a più livelli che sono totalmente connessi tra loro. Infatti, tali livelli sono costituiti in maniera che l'output di un neurone dell'i-esimo strato sia l'input di tutti i neuroni allo strato i+1. La topologia della rete fa riferimento al modello riportato per le generiche architetture multistrato, rappresentato in Figura III.14.

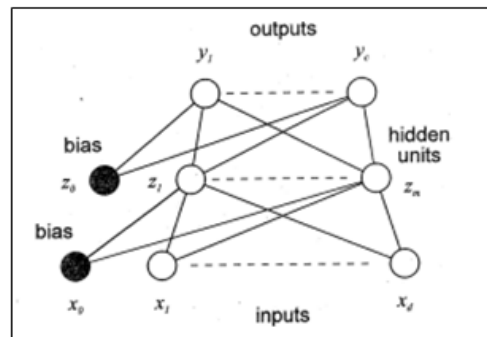


Figura III.14 Schema di una MLP

Per trovare l'uscita sarà necessario considerare gli elementi bias. Avremo quindi:

$$y_k = f\left(\sum_{j=0}^m w_{kj} g\left(\sum_{i=0}^d p_{ji} x_i\right)\right) \quad \text{con } k = 1, \dots, c \quad (\text{III.26})$$

Dove f è la funzione di attivazione dei neuroni dello strato di output, g è la funzione di attivazione dei neuroni dello strato hidden, p_{ji} è il vettore dei pesi che fanno riferimento al collegamento tra i neuroni nascosti "j" e quelli

di input “ i ” e w_{kj} è il vettore dei pesi che fanno riferimento al collegamento tra i neuroni di output “ k ” e quelli nascosti “ j ”.

In questo modo, se con uno strato otteniamo solo semispazi, con due strati otterremo intersezioni di semispazi, ovvero regioni convesse, e con 3 strati intersezioni di regioni convesse ovvero figure arbitrarie che ci consentiranno di delimitare una qualsiasi classe. Utilizzando questo tipo di reti è possibile individuare qualsiasi tipo di regione ma, di contro, il processo di apprendimento risulta molto più laborioso rispetto a quello del perceptron. Infatti, se si volesse utilizzare la stessa regola di apprendimento del perceptron, non si avrebbe alcun modo di determinare quale delle unità interne ne è responsabile e non si saprebbe, di conseguenza, quale peso modificare per correggere il comportamento della rete.

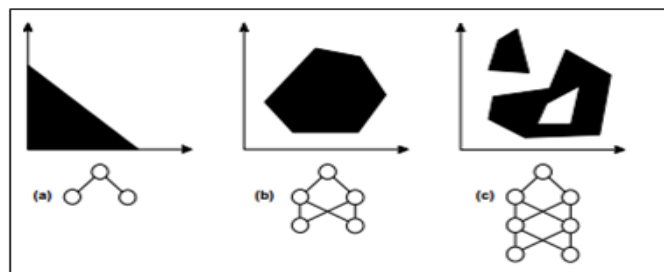


Figura III.15 Regione individuabile con una MLP ad uno strato (a), due strati (b) e tre strati (c)

Una soluzione a questo problema è rintracciabile nell’utilizzo di una funzione di attivazione differenziabile. In questo modo, la funzione errore, definita come lo scarto quadratico medio tra il valore desiderato e quello ottenuto, sarà anch’essa differenziabile. La differenziabilità della funzione errore è necessaria all’applicazione dell’algoritmo di apprendimento supervisionato di back – propagation.

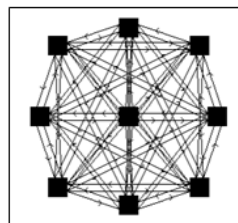


Figura III.16 Schema di una rete di Hopfield

Per gli strati nascosti e di output delle reti MLP, spesso, vengono utilizzate, come funzioni di attivazione, la sigmoide o la tangente iperbolica in quanto, le loro forme derivate, semplificano l’applicazione dell’algoritmo di back – propagation. Per lo strato di input, che funge da buffer, viene

Capitolo 3

utilizzata una funzione a rampa. In questo modo essi limitano i valori da accettare in input.

Per illustrare una rete ricorrente consideriamo la rete di Hopfield. Tali ANN sono reti ricorrenti ad uno strato in cui ogni neurone è connesso a tutti gli altri tramite legami bidirezionali. I neuroni non sono collegati con se stessi. La rete si può dire simmetrica in quanto i collegamenti sinottici bidirezionali hanno uguale valore.

Le reti di Hopfield sono più di una in quanto variano in alcuni aspetti. Però in ognuna di esse la funzione di attivazione è non lineare, ad esempio avremo la funzione segno o a soglia. Le reti di Hopfield hanno il chiaro intento di ricreare la struttura cerebrale dove i collegamenti tra i neuroni sono fitti e non di tipo feedforward. Le proprietà collettive del modello producono una memoria associativa per il riconoscimento di configurazioni corrotte e il recupero di informazioni mancanti. Perciò dopo l'addestramento di una rete di Hopfield su un insieme di esempi, un nuovo stimolo porterà la rete a stabilizzarsi su una configurazione di attivazioni corrispondente all'esempio, nell'insieme di addestramento, che assomiglia di più al nuovo stimolo.

3.3.6 Overfitting, early – stopping e crossvalidation

Si parla di overfitting quando un modello statistico si adatta ai dati osservati usando un numero eccessivo di parametri. In questo caso, l'errore sul training set è estremamente basso, ma quando si presenta un nuovo ingresso, l'errore commesso è molto grande. In questo caso, la rete ha memorizzato gli esempi di addestramento, ma non ha imparato a generalizzare. Osserviamo che se il numero di parametri della rete è molto più piccolo del numero di esempi di addestramento, la possibilità di overfitting è scarsa o addirittura nulla. Quindi, se è possibile dimensionare il training set in maniera opportuna, si riesce a prevenire il problema. Nei casi in cui ciò non avviene si possono usare alcune tecniche come l'early – stopping. Il fenomeno di overfitting può essere evitato se l'addestramento della rete viene arrestato in prossimità del minimo della curva dell'errore di test. Questa tecnica prende il nome di early – stopping e permette di migliorare la generalizzazione di una rete anche se la dimensione del modello scelto è più grande del dovuto. Questo metodo prevede di suddividere i dati a disposizione in tre sottoinsiemi:

1. Training set;
2. Validation set;
3. Test set.

Durante il processo di addestramento si calcola l'errore sul validation set, che è circa il 15% del training set. Di solito, sia l'errore sul validation set che

l'errore sul training set decrescono durante la prima fase di addestramento. Quando l'errore sul validation set sale per un determinato numero di epoche, l'addestramento viene interrotto e vengono restituiti i pesi e i bias corrispondenti al minimo dell'errore di validazione. Tale fenomeno può essere graficamente osservato in Figura III.17.

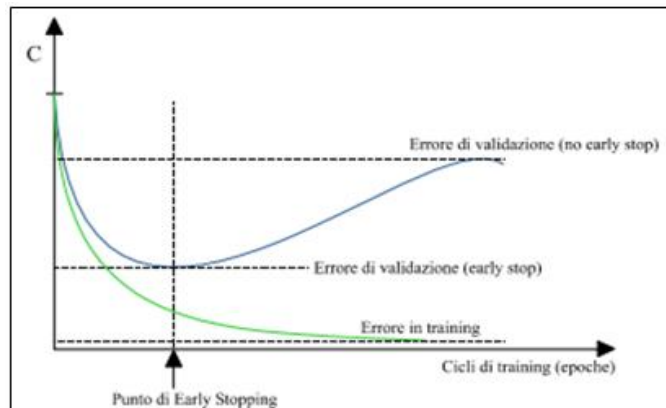


Figura III.17 Curve di training e validazione in caso di overfitting con applicazione di early – stopping

Osserviamo che l'errore sul test set non viene utilizzato durante la fase di addestramento. Tale errore viene usato per confrontare tra loro reti diverse. Infatti, per valutare la capacità di generalizzazione di una rete, e per non farsi ingannare da bassi errori di training di reti overfittate, si usa la tecnica di crossvalidation. Tramite questa tecnica si valuteranno le prestazioni della rete su un test set scegliendo la rete che fornisce i valori più bassi di errore.

Nello sviluppo dei modelli dovremo fare attenzione all'insorgenza dell'overfitting e, perciò, saranno applicate sia la tecnica dell'early – stopping che la crossvalidation.

3.3.7. Vantaggi e svantaggi delle reti neurali

L'utilizzo delle ANN presenta, come per tutti gli strumenti esistenti, vantaggi e svantaggi. I principali vantaggi sono:

1. Calcolo in parallelo: le reti permettono l'elaborazione di un moltissimi dati.
2. Versatilità: le reti neurali sono applicabili a svariati ambiti.
3. Capacità di generalizzare: a partire da alcuni dati di training è possibile il riconoscimento facciale o di caratteri. Si possono realizzare memorie associative.
4. Resistenza al rumore: le reti neurali sono dotate di una buona immunità al rumore; se alcune unità del sistema dovessero

Capitolo 3

funzionare male, la rete nel suo complesso avrebbe delle riduzioni di prestazioni ma difficilmente andrebbe incontro ad un blocco del sistema.

5. Comportamento dinamico: le reti rispondono in maniera diversa agli stimoli rispetto a quanto definito inizialmente. E' capace di apprendere.

Gli svantaggi, invece sono:

1. Modello black – box: i modelli prodotti, anche se efficienti, spesso non sono pienamente comprensibili né spiegabili.
2. Possibile mancata convergenza: non sempre esiste un algoritmo di apprendimento che converga verso una certa soluzione.
3. Necessità dati di training: dati non sempre facilmente accessibili.
4. Presenza costante dell'errore: nonostante spesso si arrivi ad un risultato soddisfacente, bisogna considerare che sarà sempre presente una certa tolleranza sul risultato ottenuto.
5. Difficoltà nel definire la rete: siccome non esistono teoremi che consentono di definire la migliore rete per i vari problemi, spesso, la buona riuscita della rete dipende dall'esperienza del progettista.

Le reti neurali trovano applicazione in molti ambiti in quanto si tratta di uno strumento preziosissimo perché capace di fornire un approccio univoco a differenti tipi di problemi.

3.4. Analisi della letteratura: modelli per la previsione del

potenziale solare

Il dimensionamento e l'analisi di un sistema a concentrazione, sia esso impiegato solo per fini elettrici, come nel caso dei sistemi CPV, oppure si interessi di produzione combinata di energia, non può prescindere da una stima efficace di quello che è definito: potenziale solare.

Tale termine sta ad indicare la potenza raggiante media per unità di superficie che in un anno è presumibile avere in una determinata località. In questi termini, tuttavia, il potenziale solare rimane una stima ancora parziale che non permette di analizzare nello specifico l'effettiva bontà dell'installazione di un sistema solare. Infatti, per poter scendere nel dettaglio dell'analisi, occorre poter stimare con buona approssimazione la potenza raggiante incidente giornalmente. In questi termini, possiamo configurare il potenziale solare come la radiazione globale giornaliera per una determinata località. La conoscenza di una stima puntuale giornaliera della radiazione globale permette il dimensionamento e la valutazione dell'energia producibile da impianti fotovoltaici oppure da impianti termici.

Come osservato nei capitoli precedenti, i sistemi a concentrazione sfruttano la componente diretta della radiazione globale. Tale componente, seppur rappresenti la maggior parte della radiazione globale, è fortemente affetta dalla nuvolosità. Pertanto per la stima della radiazione diretta, la semplice analisi giornaliera, potrebbe essere ancora una volta approssimativa. In questo caso, come vedremo nel seguito, stime più precise si riferiscono ad un'analisi oraria per tale componente.

Riassumendo quindi, il potenziale solare si riconduce per impianti basati su tale fonte, all'analisi per una determinata località della radiazione globale e di tutte le sue componenti. La base principale per il corretto dimensionamento di un impianto sarebbe la disponibilità di dati sperimentali per ciascuna località. L'impossibilità di avere dati così precisi, porta alla necessità di modelli di previsione. Tra i modelli analizzati in letteratura e che permettono stime più precisi ci sono sicuramente i modelli alle reti neurali per la radiazione globale e diretta. In questa sezione, verranno analizzati tali modelli indicando le peculiarità e le principali variabili di ciascuno.

3.4.1. Introduzione alla modellistica in letteratura per la previsione della radiazione globale e diretta

La previsione della radiazione solare costituisce, dal punto di vista modellistico, un problema ad elevata complessità. Le principali difficoltà sono legate alla non linearità delle previsioni ed alla presenza di numerose variabili eterogenee come ad esempio parametri climatici, radiometrici e geografici. Numerosi metodi sono stati sviluppati al fine di ottenere previsioni, nel breve periodo, più vicino possibile a quelli che sono i valori effettivamente rilevati. Nella maggior parte dei casi, tali metodi utilizzano come base di partenza le rilevazioni raccolte sul campo da molteplici stazioni di misura (Lazzaroni et al., 2015). Altri modelli possono essere impiegati con lo scopo di assicurare una buona previsione dell'ammontare di energia solare incidente su una determinata località. Tra questi possiamo riconoscere metodi empirici (Loutzenhien et al., 2007), metodi numerici, metodi statistici (Noorian et al., 2008) oppure metodi fisici. In particolare, in letteratura si possono esaminare differenti esempi di modelli fisici, i quali impiegano principalmente numerose equazioni lineari per la previsione della radiazione solare globale. Nello specifico tali lavori sfruttano modelli di decomposizione (Yao et al., 2015), parametri atmosferici (Polo et al., 2016) oppure compiono analisi meteorologiche (Kambeizidis et al., 2016). Tale tipo di approccio, tuttavia, non sempre garantisce un'accurata previsione, soprattutto considerando una variabilità oraria dell'energia solare.

In questo senso, una soluzione molto interessante è quella che impiega modelli basati su intelligenza artificiale, i quali rappresentano un ottimo strumento per risolvere problemi non lineari. I modelli alle reti neurali,

Capitolo 3

dall'inglese artificial neural network (ANN), permettono di affrontare problematiche che prevedono la presenza di molti fenomeni fisici. Ad esempio sono ampiamente impiegate per svariate applicazioni quali: classificazione ed estrazione dei dati, riconoscimento di segnali, complessione di immagini (Linares-Rodriguez et al., 2013) ed altre. Le reti neurali adottano serie storiche pluriennali, lavorando come un modello “a scatola nera”, che a partire dai dati di input cercano di ricostruire il segnale in uscita, consentendo la mappatura di fenomeni non lineari. Pertanto, le reti neurali rappresentano metodi alternativi ai tradizionali al fine di predire il potenziale dell'energia solare per differenti località (Sahin et al., 2013; Hasni et al., 2012). In particolare, i modelli ANN possono stimare la radiazione solare e le sue componenti. In questo senso è importante sottolineare nuovamente come la radiazione globale oppure la radiazione diretta possono essere sfruttate a seconda delle caratteristiche del sistema solare scelto. L'impiego delle reti neurali, nel settore delle energie rinnovabili, è stato inizialmente analizzato da Kalogirou (Kalogirou, 2001), ed in seguito, è stato applicato per lo studio di differenti sistemi solari. Nello specifico sono state impiegate per analisi termiche e studio di scambiatori di calore (Mohanraj et al., 2015), per analisi energetiche sugli edifici (Kumar et al., 2013) e per la previsione della radiazione solare (Yadav e Chandel, 2014).

Molti studi che trattano la previsione della radiazione solare attraverso l'impiego delle reti neurali, sono stati sviluppati coinvolgendo differenti parametri in funzione dell'obiettivo dell'analisi e della disponibilità di dati.

Nelle sezioni successive analizziamo i modelli alle reti neurali sviluppati in letteratura, focalizzando l'attenzione sulle configurazioni impiegate. In questo senso, sia per le reti neurali che hanno come obiettivo la previsione della radiazione globale, sia per quelle che, invece, analizzano la radiazione diretta, si valuteranno le caratteristiche topologiche e le variabili impiegate. Le caratteristiche topologiche sono intese in termini di numero di strati, numero di neuro e funzioni di trasferimento, mentre i principali parametri analizzati sono quelli che costituiscono lo strato di input.

3.4.2. La previsione della radiazione solare basata su modelli alle reti neurali artificiali

Le reti neurali artificiali rappresentano uno strumento matematico impiegato nella risoluzione di problemi differenti. I modelli alle reti neurali permettono di ottenere i risultati in uscita a partire da un determinato insieme di parametri in ingresso senza considerare alcuna predeterminata relazione tra input ed output (Celik e Muneer, 2012). Le reti neurali artificiali operano principalmente attraverso l'interconnessione tra un certo numero di neuroni, i quali costituiscono centri di processo localizzati tra gli input e gli output. In questo senso, tali modelli, come detto, lavorano come una “black box”,

definendo per ciascun caso specifico alcune caratteristiche peculiari della rete quali: input, numero di strati nascosti, numero di neuroni negli strati nascosti, funzioni di addestramento per il processo di apprendimento da un determinato insieme di dati pregressi, funzioni di trasferimento che permettono alle informazioni di fluire dallo strato di input a quello di output. Esistono differenti tipi di connessioni per il trasferimento dei dati; la struttura più impiegata è la multi layer perceptron (MLP) (Chen et al., 2013). Tale struttura costituisce un modello di rete neurale di tipo feed – forward, la quale prevede che le informazioni fluiscono dallo strato di input a quello di output senza ricevere alcun feedback durante la catena di trasferimento. Pertanto, la maggior parte delle reti neurali impiegate per la previsione della radiazione solare e delle sue componenti risulta costituita da una MLP. Nelle sezioni successive saranno illustrati alcuni esempi in letteratura dell'utilizzo di reti neurali per la stima della radiazione solare. Nello specifico verranno suddivisi i modelli impiegati per la radiazione globale, dai modelli impiegati per la radiazione diretta.

3.4.3. Modelli ANN per la previsione della radiazione globale

La maggior parte dei modelli sviluppati in letteratura prevedono l'impiego delle reti neurali principalmente per la previsione della radiazione globale (Teke et al., 2012). Nello specifico, i modelli per la stima della radiazione diretta sono più rari, in quanto necessitano di dati sperimentali più raffinati, non sempre disponibili e devono considerare parametri abbastanza eterogenei tra loro.

Gli studi condotti sulla previsione della radiazione globale attraverso le reti neurali artificiali sono molteplici ed offrono differenti tipologie di analisi. In particolare, tali lavori differiscono per il numero ed il tipo di variabili considerate (Yadav et al., 2014), per l'intervallo temporale dell'analisi e per l'architettura di rete impiegata.

Molti dei modelli sviluppati considerano un input mensile (Qazi et al., 2015). Ad esempio, Azadeh et al. hanno proposto una rete multi layer di tipo feed – forward, al fine di stimare la radiazione mensile per sei città in Iran. Il modello adotta variabili climatiche e meteorologiche, impiegando dati sperimentali raccolti per circa sei anni (Azadeh et al., 2009). Al contrario, Wang et al. hanno sviluppato un modello di rete neurale che prevede la radiazione globale oraria. In questo caso i dati, ottenuti sfruttando il database della “National Renewable Energy Laboratory” (NREL), sono stati collezionati tenendo conto di un orizzonte temporale di circa quattro anni (Wang et al., 2011). Le funzioni di trasferimento impiegate, in questo caso, sono la tangente iperbolica per lo strato dei neuroni nascosti, mentre la sigmoide viene utilizzata per lo strato di output.

Khatib et al., invece, hanno implementato un modello alle reti neurali basato su un'architettura MLP che stima un parametro detto “indice di

Capitolo 3

chiarezza” al fine di calcolare la radiazione globale e diffusa per differenti stazioni (Khatib et al., 2012). I dati impiegati provengono da ventotto stazioni di misura, nello specifico, i dati di ventitre stazioni sono usati per la fase di addestramento della rete, mentre i dati delle altre cinque stazioni sono impiegati per la fase di test.

Una delle fasi più importanti nella modellazione delle reti neurali per la previsione della radiazione globale è l’analisi dei parametri di input. In questo senso, ad esempio, Yadav et al. hanno impiegato la tecnica “Rapid Miner” per la scelta delle variabili di input. Il loro lavoro, inoltre, analizza l’impiego di differenti architetture di reti neurali, come le reti a funzioni radiali (radial basis function – RBF) o le reti neurali a regressione generalizzata (Yadav et al., 2015). Celik et al., invece, valutano il potenziale delle reti neurali per la previsione della radiazione globale, in alcune regioni Mediterranee della Turchia, impiegando differenti set di parametri di input (Celik et al., 2016).

Sempre parlando di studi basati sull’analisi dell’input, Behrang et. al, hanno implementato sia una MLP che una rete a funzioni radiali che si basano su sei combinazioni degli input riportati (Beharang et al., 2010). I dati sono stati raccolti tra il 2002 ed il 2006 per la città di Dezful in Iran. In questo caso, i dati misurati tra il 2002 ed il 2005 sono stati usati per addestrare la rete neurale, mentre i data raccolti nel 2006 hanno rappresentato l’insieme di valori di test. Anche Zervas et al., hanno sviluppato una rete neurale di tipo RBF. In questo caso, l’obiettivo è stato quello di ridurre al minimo il numero di variabili di input. Pertanto, le uniche variabili impiegate sono state le condizioni climatiche e la durata del soleggiamento (Zervas et al., 2008).

Si può quindi osservare come lo studio delle reti neurali per la previsione della radiazione solare, viste le molteplici scelte da compiere nella progettazione della rete, si avvale spesso di strumenti supporto alle decisioni, come metodi statistici oppure altri modelli complementari. In questo senso, ad esempio, Gairaa et al. hanno investigato un approccio combinato alla previsione della radiazione solare. Il loro lavoro (Gairaa et al., 2016), infatti, si basa sull’accoppiamento del modello di Box – Jenkins con i modelli alle reti neurali.

Un altro caso in cui differenti modelli di rete neurale vengono analizzati al fine di ottenere risultati predittivi quanto più affinati possibile è offerto da Benghanem e Mellit. Nel loro lavoro (Benghanem e Mellit, 2010), gli autori hanno analizzato sia una rete MLP che una rete RBF, sfruttando quattro combinazioni differenti di input. In questo caso, la previsione della radiazione globale giornaliera è stata resa possibile attraverso l’impiego di serie storiche della durata di quattro anni, collezionate grazie all’ausilio del NREL, per la città di Al-Madinah (Arabia Saudita). Un ulteriore esempio di combinazione di differenti metodi per la previsione della radiazione globale attraverso le reti neurali è offerto da Yacef et al., i quali hanno sviluppato differenti tipi di reti neurali tra cui anche reti neurali Bayesiane (BNN)

(Yacef et al.,2012). Come detto in precedenza, è fondamentale la disponibilità di dati per l'addestramento delle reti. Tuttavia, è possibile attraverso la giusta scelta dei parametri di input, riuscire a ricostruire la previsione anche per località per le quali non si hanno dati a disposizione. Ad esempio, Amrouche e Privert hanno sviluppato due modelli che sfruttano dati locali previsionale, in questo modo sono stati in grado di ottenere stime della radiazione globale per luoghi in cui le misurazioni sul campo non sono disponibili (Amrouche e Privert, 2014).

La radiazione globale giornaliera è stata investigata anche da Bilgili e Ozgoren. In questo caso, gli autori si sono soffermati sulla previsione della radiazione giornaliera per la città di Adana in Turchia. La peculiarità del loro lavoro sta nell'impiego di differenti modelli come: una rete di regressione multi – lineare (multi-linear regression – MLR), una rete di regressione non multi – lineare (multi-nonlinear regression – MNLR) ed una classica MLP (Bilgili e Ozgoren, 2011). Infine, un ultimo esempio è il modello elaborato da Yadav e Chandel per la stima del potenziale solare per alcune regioni in India (Yadav e Chandel, 2015). Il loro modello prevedeva che gli input della rete neurale fossero selezionati attraverso l'algoritmo J48. In questo modo hanno osservato che i fattori più importanti tra i parametri di input sono: la temperatura, l'altitudine ed il numero di ore di luce.

La previsione della radiazione globale è, quindi, un problema affrontato in differenti modalità attraverso le reti neurali. Lo studio degli esempi in letteratura ha permesso di sviluppare una metodologia per la definizione di un modello che consentisse di stimare il potenziale solare al fine di dimensionare e valutare diversi sistemi a concentrazione. Prima di passare ai modelli per la previsione della radiazione diretta, riportiamo nel seguito alcuni esempi di sviluppo delle reti neurali per la radiazione globale analizzati più approfonditamente. In questo modo è possibile osservare come i modelli sono stati sviluppati e quali parametri sono stati osservati al fine di stabilire la bontà delle reti progettate.

3.4.3.1. Modello ANN con MLP e BP per la previsione della radiazione globale in regioni remote

Il modello di ANN illustrato in questa sezione è frutto del lavoro di alcuni ricercatori iraniani (Azadeh et al., 2009). La rete in questione fa riferimento ad una struttura MLP. Una volta acquisiti i risultati forniti dalla rete, gli autori hanno proceduto con il confronto con i risultati derivanti da un modello fisico convenzionale come quello di Angstrom. All'interno del lavoro esposto è stato utilizzato un modello ANN separato per sei città diverse, in Iran. Inoltre, l'utilizzo di un modello ANN integrato, è stato previsto per tutto il territorio iraniano.

L'uscita può essere rappresentata in questo modo:

$$y_t = \alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j f(\sum_{i=1}^m \beta_{ij} y_{t-1} + \beta_{0j}) + \varepsilon_t \quad (\text{III.27})$$

Dove: m è il numero di nodi di input; n è il numero di nodi nascosti; f è la funzione di attivazione sigmoide; $f(x)$ rappresenta il vettore dei pesi dei collegamenti tra i nodi nascosti e quelli di output; β_{ij} è il vettore dei pesi dei collegamenti tra lo strato di input e quello nascosto; α_0 è il peso del collegamento tra il termine bias e i nodi di output; β_{0j} è il peso del collegamento tra il termine bias e i nodi nascosti.

Si noti l'utilizzo della funzione di attivazione lineare per lo strato di output e per quello di input. L'algoritmo di apprendimento utilizzato è quello tipico delle reti MLP e cioè quello di back – propagation. Il modello considera i parametri d'ingresso ritenuti più efficaci per una previsione completa della radiazione.

In primo luogo, sono stati considerati nove parametri d'ingresso distinti. In particolare: la posizione, mese, temperatura massima media, temperatura minima media, umidità relativa media, pressione di vapore media, totale delle precipitazioni, velocità del vento media e la durata media di soleggiamento. In base alle indagini svolte dai ricercatori, i parametri posizione e mese hanno mostrato un'intensa correlazione con gli altri parametri di input. Pertanto, i due parametri sopracitati sono stati presi in considerazione come fattori non necessari visto che il loro effetto si è riflesso sugli altri ingressi. Per ciascuno dei sette ingressi viene considerata la media mensile delle quantità giornaliere. Per il parametro di ingresso "precipitazione totale" vengono utilizzati valori mensili. Il parametro di uscita della rete rappresenta una media quotidiana su base mensile della radiazione globale solare. I dati sono stati raccolti per un periodo di sei anni, dal 1995 al 2000, per sei città diverse in Iran. Tali dati sono stati divisi in due gruppi: il sottoinsieme di addestramento, che fa riferimento a 65 mesi e il sottoinsieme di test che considera i restanti 7 mesi. Definita la metodologia si sono generate e testate diversi tipi di MLP.

Per migliorare le prestazioni delle reti sono stati utilizzati il momentum che è una tecnica usata nella back – propagation per ridurre la probabilità di oscillamento dei pesi e il weight decay che, invece, consente di non avere un numero di neuroni dello strato nascosto troppo elevato. Ciò, infatti comprometterebbe le capacità di generalizzazione della rete. Infine è stato adoperato il pruning che consiste nell'eliminazione di connessioni neurali che non hanno un effetto significativo sulle funzionalità della rete. Per decidere quali connessioni neuronali andassero eliminate si è esaminata la cosiddetta "rilevanza" di peso. Se tale grandezza, dopo una serie di epoche di apprendimento, è inferiore ad un certo valore di soglia allora la connessione viene tagliata.

Tabella III.1 Risultati di differenti MLP

# Modello MLP	1	2	3
# neuroni nascosti nel primo strato	6	4	4
# neuroni nascosti nel secondo strato	2	2	0
Metodo di apprendimento	BP con momentum e weght decay	BP con momentum e weght decay, pruning	BP con momentum e weght decay, pruning
Errore relativo (MAPE)	0.067	0.047	0.045
# Modello MLP	4	5	6
# neuroni nascosti nel primo strato	4	3	6
# neuroni nascosti nel secondo strato	0	0	2
Metodo di apprendimento	BP con momentum e weght decay	BP con momentum e weght decay	BP con momentum e weght decay, pruning
Errore relativo (MAPE)	0.07	0.06	0.03

Delle diverse reti testate vengono riportati i risultati delle sei migliori. Ogni rete è stata testata su dati provenienti da un'unica città in maniera da svincolarci dalla dipendenza dalla città per valutare le varie reti. Le varie reti differiscono nel numero di neuroni per strato come mostrato in Tabella III.1.

Le varie tipologie di rete sono state valutate in base ad un parametro: il MAPE (mean absolute percentage error). Esso è definito nel seguente come:

$$e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|SR_{i(\text{estimated})} - SR_{i(\text{actual})}|}{SR_{i(\text{actual})}} \quad (\text{III.28})$$

Dove, n=12, mentre per SR si intende la radiazione solare. Come si evince dalla tabella la rete migliore è quella avente 6 neuroni nel primo strato nascosto e 2 nel secondo strato nascosto con BP, momentum e pruning. Per tale rete l'errore medio percentuale assoluto è risultato del solo 3%. Lo

Capitolo 3

stesso confronto è stato effettuato per le altre città considerate. L'architettura della rete configurata può essere osservata in Figura III.18.

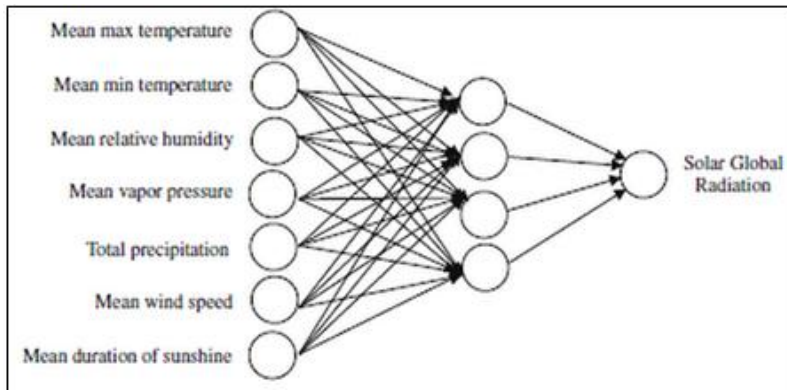


Figura III.18 Schema della MLP configurata

Per mostrare la precisione dei modelli sono stati considerati altri due parametri: RMSE (root mean squared error) che descrive la quantità di errori durante la fase di apprendimento ed R^2 che è la frazione assoluta della varianza che rappresenta la proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato. Analiticamente essi sono definiti come:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SR_{i(estimated)} - SR_{i(actual)})^2}{n}} \quad (III.29)$$

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (SR_{i(estimated)} - SR_{i(actual)})^2}{\sum_{i=1}^n SR_{i(actual)}^2} \right) \quad (III.30)$$

Definiti RMSE e R^2 , i vari modelli sono stati analizzati ed i risultati sono riportati in Tabella III.2.

Tabella III.2 Valori dei parametri statistici per le diverse città

Città	MAPE [%]	RMSE [%]	R^2
Bandar Abbas	3.0	2.6	0.98
Kerman	5.7	3.0	0.92
Kermanshah	6.7	3.2	0.97
Tehran	7.0	2.7	0.95
Esfahan	6.8	3.3	0.97
Zahedan	11	5.2	0.86
Media delle città	6.7	3.3	0.94

La media di MAPE per tutti i modelli è 6,7% e il valore medio di R^2 è 0,94. Ciò mostra l'efficienza dei modelli ANN per prevedere la radiazione solare attraverso parametri climatologici. Dopo lo studio di diversi modelli per diverse città è stato considerato un modello integrato valido per tutto il territorio iraniano. Tale modello prevede l'utilizzo di una rete MLP e presenta un errore medio di circa 7,5%. Infine, viene presentato un confronto tra i risultati ottenuti grazie alla rete integrata e i risultati ottenuti tramite un modello convenzionale, come quello di Angstrom. In particolare, utilizzando il modello di Angstrom si ha un errore medio del 14.8%. Tale confronto permette di evidenziare la maggiore precisione, di quasi il 50%, dei modelli ANN rispetto a quelli tradizionali.

3.4.3.2. *Modello Gaussiano di previsione della radiazione globale giornaliera*

In questo studio (Zervas et al., 2009) è stato sviluppato un modello di previsione dell'irraggiamento solare globale sulle superfici orizzontali. La metodologia definita dal modello prevede l'utilizzo di ANN applicate al database meteorologico di NTUA.

Il lavoro mira allo sviluppo di un modello empirico in modo che la richiesta di informazioni di input sia minima. Il modello considera la radiazione come una funzione dello stato meteorologico e del numero di "decimi di luce". Per "decimi di luce" si intendono il numero di periodi di 10 minuti di luce del giorno. Tuttavia mantenere il numero di informazioni in ingresso minimo porta ad una validità solo locale del modello. La previsione della distribuzione quotidiana della radiazione globale è basata sull'introduzione di una funzione gaussiana. Successivamente viene sviluppato un database con i valori stimati dei parametri della gaussiana, validi per tutti i giorni di un intero anno solare. Infine, viene sviluppata una rete RBF che permette di predire l'ampiezza della gaussiana.

Lo sviluppo di un modello basato su una funzione gaussiana prevede, innanzitutto, la definizione della funzione che sarà utilizzata per prevedere la distribuzione giornaliera della radiazione:

$$J(x) = M \cdot e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{III.31})$$

Quest'equazione è caratterizzata da due parametri di forma della curva: M che è l'ampiezza e σ che è la "larghezza". Il centro del dominio di definizione della funzione, dove quest'ultima è pari al massimo valore M , è posto pari a 0 (come si evince dalla funzione stessa). Nella scala temporale, allora, il centro rappresenta il momento in cui si ha la massima irradiazione. A questo punto è ovvio dire che la variabile x rappresenta un tempo. In particolare x è la differenza di tempo (in periodi di 10 minuti) tra il tempo in

Capitolo 3

cui la previsione $J(x)$ è richiesta ed il “mezzogiorno”. Chiaramente se un certo giorno L rappresenta la metà del numero dei decimi di luce, allora avremo, al massimo, che $x^2 = L^2$. Il valore di L per un certo giorno è facilmente ottenibile:

$$\text{numero di decimi di luce} = 2L = 2 \cdot |\omega_s| \cdot \frac{6}{15} \tag{III.32}$$

Dove ω_s è l’angolo del sorgere e del tramontare del sole, in gradi. Dopo aver definito L si può esplicitare una relazione che lega L stesso e σ . Si ha quindi:

$$J(x) = M \cdot e^{-\alpha \frac{x^2}{L^2}} \tag{III.33}$$

Il vantaggio della nuova espressione deriva dall’utilizzo di α che è il coefficiente adimensionale di sintonizzazione. Infatti, è dimostrato che è possibile ottenere un valore fisso di α che permetta il corretto funzionamento del modello per un determinato giorno e in qualsiasi condizioni atmosferiche. Il modello descritto dall’equazione riportata in alto è detto modello SGGSI (simple gaussian global solar irradiance model).

Per il funzionamento corretto del modello sono stati registrati i valori dello stato meteorologico, di L , di M , e di α per un intero anno ogni 10 minuti. I primi due parametri saranno, poi, gli input alla rete mentre gli altri due saranno gli output.

Lo stato meteorologico è stato modellato tramite la variabile che rappresenta la presenza di nuvole. Per assegnare uno stato ad ogni particolare giorno, la distribuzione della GSI è stata graficata in funzione del numero di decimi di luce e successivamente è stato chiesto ad un esperto meteorologo di effettuare la classificazione.

In tabella III.3 sono indicizzati i valori assegnati ad ogni stato esaminato mentre in Figura III.19 è possibile osservare la radiazione globale per ciascun giorno, a seconda dello stato meteorologico assegnato.

Tabella III.3 *Stato delle condizioni meteorologiche*

Descrizione	Stato
Clear	6
Few clouds	5
Partly cloudy	4
Cloudy	3
Heavy clouds	2
Rainfall	1

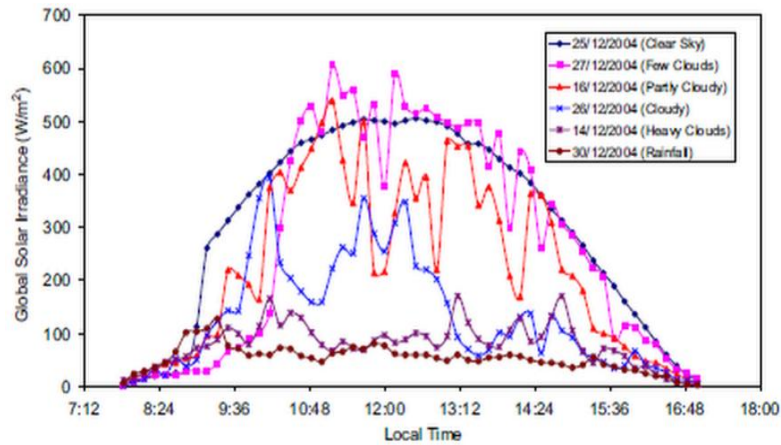


Figura III.19 Condizioni meteorologiche e radiazione globale

Il parametro L è stato rintracciato tramite la formula riportata in precedenza. Per ottenere M si è visto che, attraverso una media, la massima irradiazione giornaliera si verifica generalmente alle 12:25. Per ottenere α , invece, è stato formulato e risolto un problema dei minimi quadrati.

A questo punto, avuti i dati, è necessario definire la struttura della rete che consenta di ottenere gli output. L'architettura di rete neurale scelta è la RBF a tre strati. La scelta è ricaduta su RBF perché esse presentano alcuni vantaggi: semplice topologia di rete, realizzano l'approssimazione locale piuttosto che il globale e dispongono di veloci algoritmi di apprendimento. La formazione di una rete RBF in realtà significa la determinazione del numero di nodi nello strato nascosto, dei centri dei nodi nascosti e dei pesi di uscita, in modo che la deviazione tra il valore predetto e quello misurato sia minima. La rete RBF è strutturata in modo da poter prevedere la variabile di uscita M considerando il vettore di input u è definito come:

$$u = [S \quad L]^T \tag{III.34}$$

L'uscita della rete neurale fornisce il valore stimato di M , che è \hat{M} . Esso è definito come la media pesata dell'uscita dei nodi nascosti:

$$\hat{M} = \sum_{c=1}^C w_c z_c(u) \tag{III.35}$$

Dove:

$$z_c(u) = f(\|u - u_c\|^2) \tag{III.36}$$

Nell'equazioni sopra z_c è la risposta del nodo c -esimo, f è la radial basis function, u_c è il centro del nodo c -esimo, C è il numero totale di nodi nascosti e w_c è il peso corrispondente alla risposta del nodo c -esimo.

Seguendo la procedura di formazione tipica delle reti neurali i dati disponibili sono stati partizionati in modo casuale per la formazione di un

Capitolo 3

insieme di validazione e uno di addestramento in una proporzione di 25% a 75% (274 e 92 giorni), rispettivamente. Il modello RBF prodotto è costituito da 16 nodi nascosti. La Figura III.20 mostra l'andamento degli M-valori previsti rispetto a quelli sperimentali:

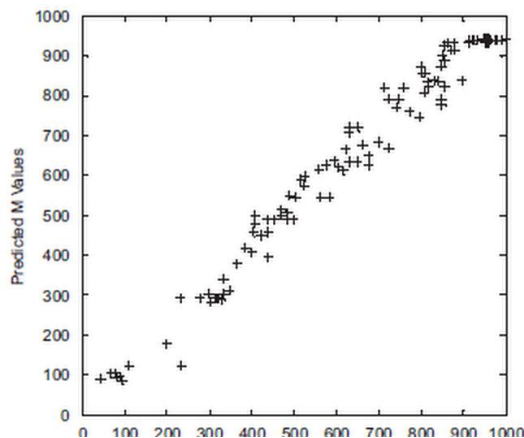
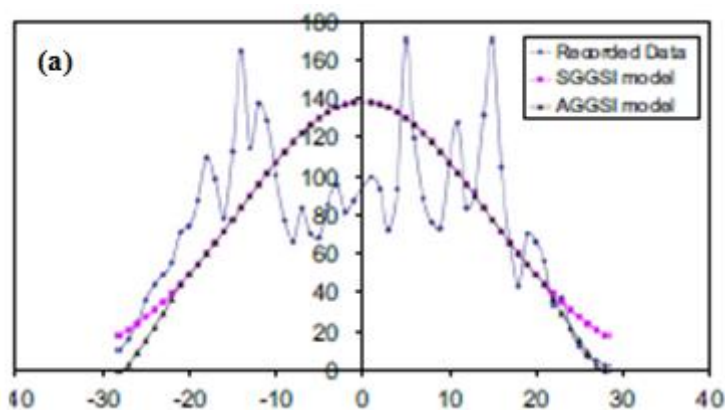


Figura III.20 Scatterplot dei valori previsti

Il corrispondente coefficiente di determinazione R^2 è stato 0.985. Al fine di dimostrare che il successo del modello non è stato il risultato di un caso sono state sviluppate 100 reti differenti sulla base di 100 diverse partizioni casuali dei dati nella formazione e nel set di validazione. La robustezza del metodo è dimostrata poiché i coefficienti di determinazione R^2 erano oltre 0.98 per tutte le 100 partizioni. Nelle Figure III.21 a e III.21 b, possiamo osservare l'andamento della previsione della radiazione giornaliera per tutti i sei stati meteorologici. Si può notare la maggiore difficoltà nel seguire la radiazione globale rilevata quando la nuvolosità è considerevole.



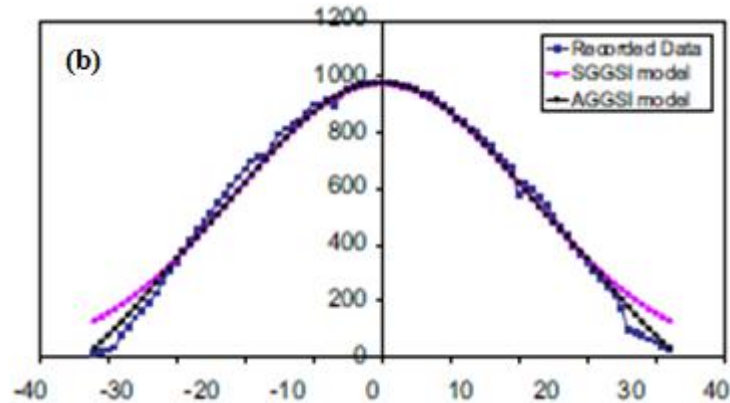


Figura III.21 Andamento della previsione giornaliera: (a) giornate nuvolose; (b) giornate soleggiate

3.4.3.3. Modello ANN feed – forward con BP per la previsione della radiazione globale a breve termine

Il modello di ANN per la previsione della radiazione globale, presentato in questa sezione, è stato sviluppato da un team di studiosi cinesi (Wang et al., 2011). Nello studio sono stati utilizzati, per la modellazione della radiazione solare, i dati provenienti dal National Renewable Energy Laboratory (NREL) campionati ogni ora. Oltre a questi dati, per costituire il modello di predizione a breve termine della radiazione, sono state impiegate reti neurali basate sull'algoritmo di back – propagation (BP) e sulle serie storiche. Interessante la parte di pretrattamento dei dati che comprende l'esclusione di dati anomali e normalizzazione. La normalizzazione è necessaria perché quando una rete neurale è applicata alla previsione della radiazione, gli ordini di grandezza differiscono a causa delle diverse unità di misura. Così i dati devono essere normalizzati prima di essere utilizzati. L'intervallo di normalizzazione è $[0.1, 0.9]$, e non lo $[0, 1]$. Invece la funzione di classificazione casuale "dividevec" è adottata per stabilire una certa proporzione dei dati campionati per formare i dati di formazione, e quelli per la cross - validation .

Per quanto riguarda la tipologia di rete utilizzata si fa riferimento, come già detto, ad una rete neurale multistrato feed – forward che utilizza come algoritmo d'apprendimento la BP. Il modello è progettato per prevedere il valore di radiazione con i dati di irradiazione precedenti e attuali. Definiti gli input e gli output della rete è stato stabilito anche il numero di livelli presenti. A riguardo, nel lavoro presentato, viene precisato che se il numero di dati campionati è grande, la rete con uno strato nascosto non può raggiungere un funzionamento efficiente a causa del declino dell'efficienza di calcolo. Così,

Capitolo 3

al fine di risparmiare tempo di formazione e ottenere un modello accurato, viene considerata la rete con due strati nascosti.

Il numero di neuroni nello strato di input e output è di 24 e 1, rispettivamente. Il numero di neuroni nello strato nascosto singolo può essere calcolato approssimativamente come:

$$m = \sqrt{n + l} + a \quad (\text{III.37})$$

Dove n sono il numero dei nodi in ingresso ed l rappresenta il numero dei nodi di output. Il parametro a è una costante che può assumere valori tra 1 e 10. Così, nel primo strato nascosto si possono avere dai 6 ai 15 nodi. La stessa formula può essere utilizzata anche per il secondo strato nascosto. Però per poter stabilire il numero esatto di neuroni per i due strati è stato necessario testare varie tipologie di reti aventi diverse quantità di neuroni nel primo e nel secondo strato nascosto. Queste reti sono, poi, valutate tramite alcuni parametri statistici: la cross-validation viene impiegata per scegliere il modello più stabile. I dati campionati vengono divisi in cinque gruppi di cui quattro faranno parte dei dati di training mentre l'altro va a costituire i dati di validazione. Nella Tabella III.4 viene riportata la comparazione delle varie strutture di rete.

Tabella III.4 Valori dei parametri statistici in funzione del numero di neuroni

# di neuroni	R ²	RMSE	MPE
7	0.9755	0.0362	1.420
11	0.9704	0.0366	1.516
14	0.9775	0.0344	0.8794
17	0.9796	0.0339	0.8469
18	0.9782	0.0332	1.069
20	0.9810	0.0338	1.106
25	0.9772	0.0343	0.6341
27	0.9776	0.0350	1.453
15, 12	0.9812	0.0396	1.085
17, 16	0.9799	0.0324	0.903
18, 6	0.9807	0.0342	0.577
18, 13	0.9912	0.0331	0.772
19, 15	0.9878	0.0355	0.761
19, 22	0.9764	0.0360	1.196
20, 17	0.9796	0.0338	1.217

Dalla tabella si evince che i modelli con 2 strati nascosti sono più precisi. Il modello migliore è caratterizzato da 18 neuroni nel primo strato e 13 nel secondo. Le funzioni di trasferimento per il primo ed il secondo strato sono

la tangente iperbolica e la sigmoide, rispettivamente. Lo strato di output adotta la funzione di attivazione lineare.

L'algoritmo di Levenberg – Marquardt (LM) è stato scelto per l'apprendimento, in quanto è il più veloce per reti feed – forward di dimensioni contenute (centinaia di pesi).

Nella fase di simulazione i dati di input sono stati raccolti per quattro anni. Tali dati sono utilizzati in due modelli di previsione basati sulle reti neurali BP e serie temporali con due livelli nascosti. I dati di ingresso e di uscita dei due modelli sono i dati di radiazione solare con intervallo di campionamento di 1 ora. La differenza tra i due modelli è che, i dati di input del modello 1 sono raccolti dalle 6:00 a.m. alle 08:00 p.m. I dati di input del modello 2 sono le intere 24 ore di dati, vale a dire, che i dati di ingresso dei due modelli sono 15 e 24, rispettivamente. Gli indicatori statistici dei due modelli sono riportati nella Tabella III.5.

Tabella III.5 Risultati statistici dei due modelli studiati

# Modello	R ²	RMSE	MPE
Modello 1	0.9645	0.0450	0.5904
Modello 2	0.9912	0.0331	0.7220

Facendo un confronto, gli indicatori statistici del modello 2 sono migliori di quelli del modello 1. Pertanto i 24 dati precedenti sono impiegati per la previsione della radiazione al passo successivo. Considerando il processo di training della rete, in Figura III.22 si può osservare l'andamento dell'errore di training (MSE).

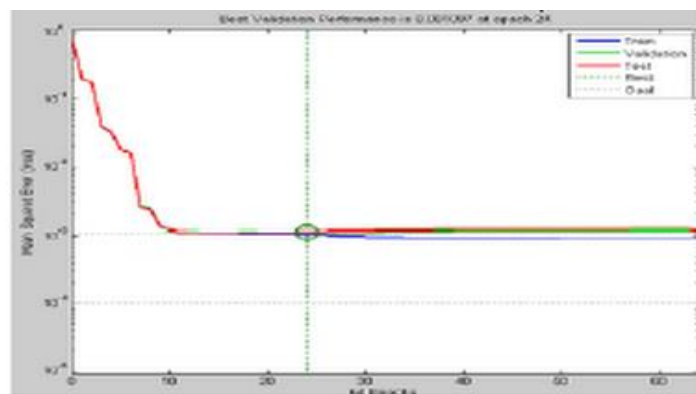


Figura III.22 Andamento dell'errore durante la fase di training

Da questi andamenti è possibile notare che l'MSE di training diventa sempre più piccolo iterazione dopo iterazione. Tale processo si blocca, e inverte, al

passo 25. Ciò indica che la rete raggiunge l'overfitting e perciò è necessario fermare il processo di apprendimento.

3.4.3.4. Modello GRNN per la previsione della radiazione solare su superficie inclinata

Il modello analizzato in questa sezione è stato proposto da Celik e Muneer (Celik e Muneer, 2012). In questo lavoro, viene utilizzato un approccio alternativo per predire la radiazione solare su superficie inclinata, utilizzando il minimo numero di variabili coinvolte nel processo fisico. Nello specifico i parametri utilizzati sono: irraggiamento solare globale su una superficie orizzontale, angolo di declinazione e angolo orario. Il modello sviluppato può fornire valori più precisi di irraggiamento solare, rispetto all'approccio tradizionale, con una media dell'errore assoluto pari a 14.9 Wh/m².

La tipologia di rete utilizzata è una rete neurale basata sulla regressione generalizzata (GRNN). Considerando i primi aspetti implementativi del modello, va precisato che i dati sono stati raccolti grazie ad un sistema sperimentale fotovoltaico grid – connected, posto in cima ad un edificio. I moduli sono stati installati con un'inclinazione pari alla latitudine del luogo, verso sud (quindi con azimut nullo). I dati di irraggiamento solare sono stati raccolti, contemporaneamente, su due superfici, di cui, una orizzontale e l'altra inclinata, con un passo temporale compreso tra 30 secondi e 5 minuti, utilizzando due piranometri, per circa 2 anni (da giugno 2004 a marzo 2006). I dati sono mediati su base oraria. Un esempio di dati misurati in due giorni diversi è riportato in Figura III.23.

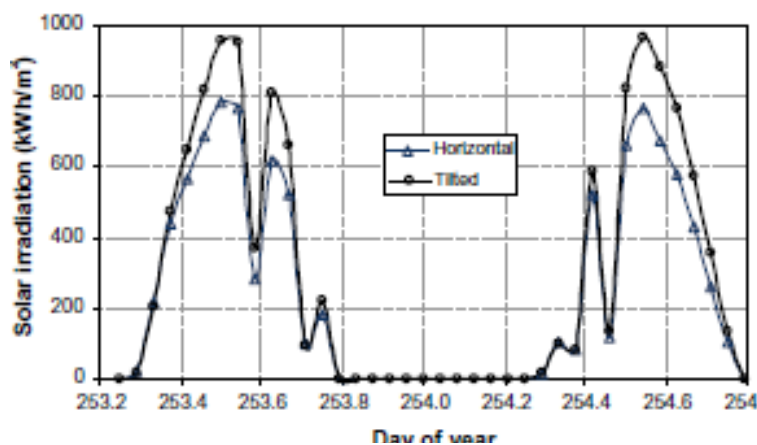


Figura III.23 Dati raccolti per due distinte giornate

Generalmente, per la stima della radiazione globale, si utilizzano reti MLP o RBF ma, in questo studio, la GRNN è stata scelta come la tipologia di rete più robusta. Tale rete è una feed – forward che svolge analisi di regressione lineare e non lineare. I pesi della GRNN possono essere stimati analiticamente ma in maniera diversa rispetto alla RBF. Infatti, la GRNN, quantifica i vettori di output (y) utilizzando i vettori di training ma, soprattutto, consente di determinare la funzione di distribuzione densità di probabilità in funzione dei parametri X e y. Quindi, con f(X, y) che rappresenta una funzione continua di distribuzione di densità di probabilità del vettore di variabili casuali (X) e variabili casuali scalari (y), la regressione di y su X, E[y|X] è calcolato come:

$$E[y|X] = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} yf(X,y)dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(X,y)dy} \quad (III.38)$$

Se non viene fornita alcuna informazione per quanto riguarda la funzione di densità di f (X, y), si può stimare con precisione da un campione di osservazioni di X e y. L'architettura della GRNN implementata è presentata in Figura III.24.

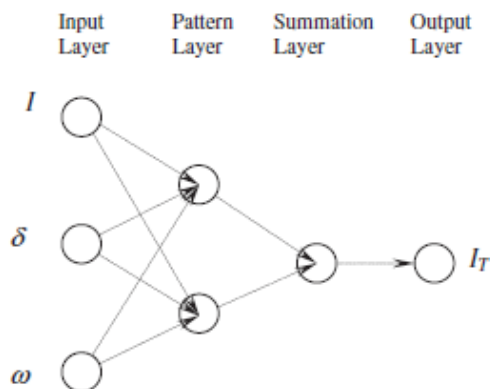


Figura III.24 Architettura della GRNN

Oltre allo strato di input e di output, si ha:

1. strato dei pattern: In questo livello, ci sono solo due neuroni (denominator e numerator summation unit) ed i pattern di ingresso subiscono una trasformazione non lineare. Il pattern sarà calcolato come una gaussiana :

$$h_i = e^{\left[\frac{(x-u_j)^T(x-u_j)}{2\sigma^2} \right]} \quad (III.39)$$

Capitolo 3

2. strato somma: esso include due unità: N e P. Il primo parametro è la somma pesata delle uscite dello strato nascosto. Il secondo parametro ha pesi pari ad uno, così, aggiungerà solo i termini esponenziali (h_i). L'uscita sarà calcolata come il rapporto di N su P.

Per la rete descritta è stato utilizzato l'algoritmo di apprendimento di Levenberg – Marquardt. Per i calcoli di rete neurale, i dati disponibili sono stati suddivisi in tre serie distinte: di training, di cross – validation e testing. In primo luogo, i dati sono stati frazionati in nove sottogruppi (quasi ugualmente). Poi, uno dei nove sottoinsiemi è stato utilizzato per la validazione mentre i restanti otto sottoinsiemi sono stati utilizzati per la formazione e la convalida incrociata. La rapidità del processo di formazione della GRNN è esemplificata in Figura III.25.

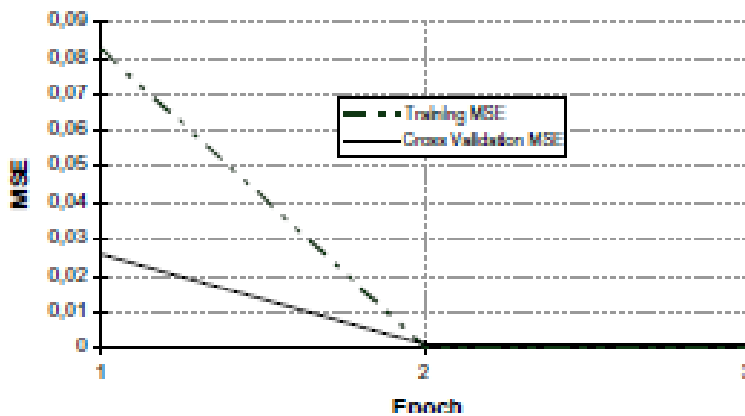


Figura III.25 Rapidità del processo di addestramento della rete

Al valore di epoche=2, l'MSE del processo di training e di cross-validation è già prossimo a zero. La precisione del modello GRNN, sviluppato, è stata confrontata con quella dei modelli di conversione della radiazione orizzontale in inclinata, isotropi e anisotropi. I primi considerano la radiazione diffusa isotropi, i secondi no. Essi sono valutati in base a MSE, MAE ed R^2 .

Dai dati ottenuti si può rilevare che in termini di MSE, il modello GRNN è il miglior stimatore dell'irradiazione per superfici inclinate. La differenza è notevole con i modelli isotropi e anisotropi. Per quanto riguarda R^2 i valori per la GRNN variano tra 0.980 e 0.997, mentre quelli per il modello isotropo e anisotropo presentano un range tra 0.939 – 0.986. Come con la statistica precedente, il modello GRNN restituisce i valori più bassi di MAE tra i tre modelli. Infine, le prestazioni del modello sviluppato sono confrontate con le prestazioni dei modelli MLP e RBF.

Nel complesso, la tipologia MLP fornisce i valori più alti di R^2 . Tuttavia, si noti che il numero di parametri di input utilizzati nello studio riportato è solo tre. Si può dedurre, quindi, che i risultati del lavoro riportato potrebbero essere ulteriormente migliorati utilizzando più dati di irraggiamento solare.

3.4.4. Modelli ANN per la previsione della radiazione diretta

Un fattore molto importante nella valutazione delle risorse di energia solare è contenuto nella possibilità di avere a disposizione dati di radiazione diretta di alta qualità. Tuttavia, generalmente, questa componente della radiazione solare è raramente misurata e quindi deve essere definita sulla base dei dati di radiazione solare globale che, nella maggior parte delle stazioni radiometriche, sono registrati. Solitamente a tal fine vengono impiegati modelli di decomposizione. Questi modelli sono basati sulla regressione di due indici adimensionali: l'indice di chiarezza k_t e la trasmittanza solare diretta, k_b (valore irraggiamento diretto/costante di irraggiamento extratrasferica).

Tali indici tuttavia sono lontani dall'avere una correlazione semplice che li unisca a causa dei complessi processi innescati dall'attraversamento dell'atmosfera da parte della radiazione solare. In questo senso, vi è una vasta gamma di valori raggiunti da k_b per un dato k_t (Lopez et al., 2005). Ciò ha portato ad includere parametri atmosferici e meteorologici aggiuntivi per i modelli di decomposizione al fine di migliorare le loro prestazioni e per tenere conto di diverse condizioni climatiche.

Un modo alternativo per evitare i problemi di cui sopra è di impiegare reti neurali. Dal momento che le reti neurali sono altamente non lineari e non richiedono alcuna ipotesi preventiva sono diventate uno strumento utile per la modellazione della radiazione solare diretta.

Le reti neurali quindi diventano fondamentali per il corretto dimensionamento di sistemi solari integrati che sfruttano la componente diretta della radiazione solare come i sistemi a concentrazione (Renno, 2014). Yadav e Chandel hanno revisionato differenti tecniche della previsione della radiazione solare, studiando svariati lavori in letteratura, tuttavia le tecniche riscontrate per la valutazione della radiazione diretta (DNI) sono poco implementate (Yadav e Chandel, 2014).

In particolare, tra i pochi riferimenti utili nella trattazione del problema, va annoverato il lavoro di Mellit et al. In questo caso, si è proceduto ad investigare una rete neurale per la previsione della DNI oraria attraverso una MLP. Il lavoro presentato (Mellit et al., 2013) confronta, inoltre, i risultati ottenuti dalla rete neurale con quelli di un modello adattivo. Kuashika et al., invece, hanno sviluppato una rete di tipo feed – forward, per la valutazione dell'indice di chiarezza della DNI. In questo caso si è notato come fosse fondamentale l'acquisizione di molti dati sperimentali, nello specifico sono stati campionati valori da circa undici stazioni di misura in India (Kaushika

et al., 2014). Infine, la valutazione dell'indice di chiarezza è stata effettuata anche da Kheradmand et al., sfruttando una rete neurale che impiega fattori ambientali e meteorologici (Kheradmand et al., 2016).

Si può quindi osservare come in letteratura, mentre un gran numero di lavori è stato implementato per la stima della radiazione globale con l'uso delle ANN, non si può dire lo stesso per la radiazione diretta. A maggior ragione, se si parla di modelli di radiazione diretta su base oraria. Pertanto, la modellazione presentata in questo capitolo si presenta come innovativa, in quanto cerca di costruire l'architettura di una rete, non solo per la radiazione globale, ma anche per quella diretta oraria.

Come analizzato in questo paragrafo, molti studi sulla modellistica della radiazione diretta si sono concentrati sulla definizione dei parametri di input per la rete neurale. Infatti, tutti i modelli empirici implementati prevedono la valutazione di alcuni fattori, come l'indice di chiarezza, che a partire dalla radiazione globale permettono una stima di quella diretta. Pertanto, possiamo analizzare nello specifico, nel paragrafo seguente, un modello per la definizione delle variabili di input per una rete neurale destinata alla stima della radiazione diretta.

3.4.4.1. Modello di rete MLP-ARD per la stima della rilevanza di variabili radiometriche al fine della previsione della radiazione solare diretta

La stima della radiazione diretta, non può prescindere dalla corretta definizione delle variabili che descrivono il problema. Pertanto, al fine di definire una rete neurale per tale previsione, vanno analizzati attentamente i fattori con maggiore impatto. Nello specifico, in questo lavoro, il framework bayesiano per ANN, denominato come automatic relevance determination method (ARD), è stato impiegato per ottenere la relativa rilevanza di un grande insieme di variabili atmosferiche e radiometriche utilizzate per la stima oraria dell'irraggiamento solare diretto (Lopez et al., 2005). Per raggiungere lo scopo riportato, è stata addestrata una rete MLP feed – forward. Inoltre, viene mostrato come tale metodologia possa essere utilizzata con successo anche in condizioni di quantità di dati disponibili limitata. Nonostante i vantaggi nell'utilizzo delle ANN, esse presentano alcuni inconvenienti. Uno di questi è relativo al fatto che le ANN tengono conto di qualsiasi variabile d'ingresso al modello, anche quelle superflue, generando un incremento inutile della complessità di calcolo. L'altro svantaggio sta nella necessità di dividere il set di dati disponibili in tre sottoinsiemi (training, test e validazione). Ciò può diventare un problema se sono disponibili solo pochi dati. Il metodo bayesiano ARD per reti MLP risolve entrambi i problemi: fornisce agli ingressi una misura di importanza

relativa ed evita la necessità di utilizzare i dati di test e di validazione separati, grazie all’inserimento di coefficienti di regolarizzazione all’interno della struttura ANN. Specificando le caratteristiche del modello va precisato che la ANN utilizzata è una MLP con un solo strato nascosto e un’uscita singola. La topologia della rete è mostrata in Figura III.26.

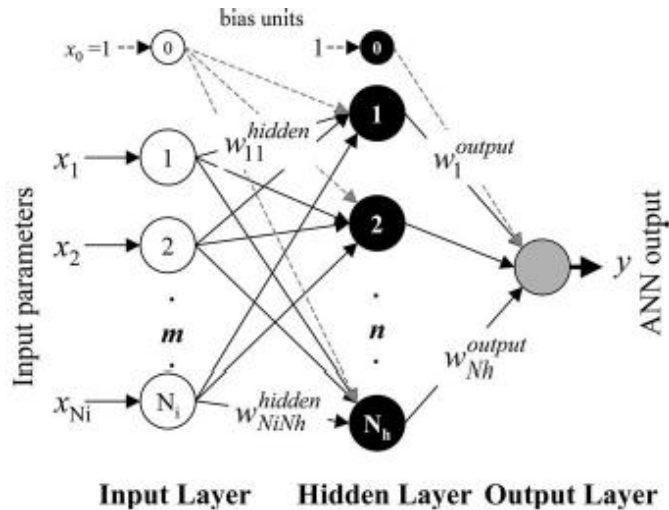


Figura III.26 Topologia della rete sviluppata per il modello MLP

La funzione di attivazione utilizzata per le unità nascoste è rappresentata dalla tangente iperbolica (\tanh), mentre la funzione identità è stata utilizzata per quelli di uscita. L’uscita può essere espressa come:

$$y = \sum_{n=1}^{N_h} w_n^{output} \tanh\left(\sum_{m=0}^{N_i} w_{mn}^{hidden} x_m\right) + w_0^{output} \quad (III.40)$$

Una volta che la rete è stata addestrata, essa è in grado di tenere conto di tutti i parametri in ingresso: rilevanti e irrilevanti. L’approccio bayesiano considera una distribuzione di probabilità a priori riferita, ai pesi $p(\vec{w}|\vec{a})$ della rete, data dal vettore di iperparametri \vec{a} , che rappresenta il “regolarizzatore” del weight decay. A causa di ciò tutti i pesi associati allo stesso nodo di ingresso sono raggruppati e faranno riferimento ad un unico iperparametro, α_g . La topologia cambia, e può essere osservata in Figura III.27.

Questi iperparametri controllano la distribuzione a priori, che si ottiene tramite una distribuzione gaussiana con media nulla e varianza pari a:

$$\sigma^2 = \frac{1}{\alpha_g} \quad (III.41)$$

da cui saranno campionati i pesi del g-esimo gruppo di connessioni.

Capitolo 3

Una distribuzione a priori $p(\vec{\alpha})$ determina i valori iniziali di α_g . Tre iperparametri supplementari sono stati definiti per tenere conto dei rimanenti gruppi di parametri di rete (input bias, hidden bias e pesi nascosti).

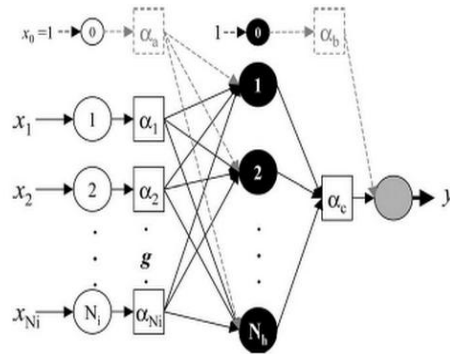


Figura III.27 Topologia di una rete MLP – ARD

Una volta che il set di dati di training, D , è stato presentato alla rete, viene impiegato il teorema di Bayes per rintracciare le funzioni incognite:

$$p(\vec{w}|\vec{\alpha}, D) = \frac{p(D|\vec{w})p(\vec{w}|\vec{\alpha})}{p(D|\vec{\alpha})} \quad (\text{III.42})$$

$$p(\vec{\alpha}|D) = \frac{p(D|\vec{\alpha})p(\vec{\alpha})}{p(D)} \quad (\text{III.43})$$

Le funzioni densità di probabilità $p(D|\vec{w})$ e $p(D|\vec{\alpha})$ sono determinate utilizzando la procedura di MacKay. La procedura viene eseguita in “s” sessioni iterative. Ogni sessione prevede due passaggi. Il primo passaggio calcola i pesi massimizzando la probabilità $p(D|\vec{w})$ tramite l'algoritmo di apprendimento della discesa del gradiente coniugato, che esegue 'c' cicli di formazione di rete.

Nella seconda fase, gli iperparametri sono stimati nuovamente “n” volte per fornire la massima precisione. I pesi di un ingresso con un grande α_g sono prossimi a zero, e quindi l'ingresso corrispondente non è rilevante. In questo modo il modello ARD tiene conto degli ingressi rilevanti.

I dati sono stati raccolti presso una stazione radiometrica situata a Rock Desert, tra il 1998 e il 1999.

L'insieme di dati contiene record di dati di alcuni importanti parametri: radiazione globale e diretta, temperatura, umidità relativa, pressione superficiale e velocità del vento. Altri due parametri sono stati derivati dai dati misurati: la temperatura di rugiada T_d , e le precipitazioni w . La posizione solare viene tenuta in considerazione utilizzando il coseno dell'angolo zenitale. In fase di trattamento dei dati, i valori di ingresso e di uscita sono stati normalizzati nell'intervallo (0,1).

Dopo aver specificato la tipologia di dati in ingresso sono stati fissati alcuni parametri riguardanti la fase di training, tra cui “s”, “c” ed “n”. Sono state effettuate alcune simulazioni per individuare i valori più adatti per il corretto funzionamento di ARD.

Il valore di n è stato fissato pari a 5. Le simulazioni sono state effettuate considerando il valore degli iperparametri rispetto al numero di sessioni di training “s”, per due reti MLP aventi 10 e 2 unità nascoste. Per ciascuna di esse sono state considerate simulazioni di 30 e 200 cicli “c”, utilizzando tutto il database. Ciò che si nota immediatamente è la costanza degli iperparametri dopo un certo numero di sessioni.

Questo comportamento è più marcato quando il numero di unità nascoste è minore. Infatti, una rete più complicata necessita di un training più lungo per poter recepire tutte le numerose relazioni tra gli ingressi e le uscite. In tal senso è interessante notare come la rete con soli 30 cicli e con 10 nodi nascosti presenti, alla fine del training, valori riferiti agli iperparametri molto vicini. Pertanto, una prescrizione per l’uso del metodo ARD è quella di utilizzare una ANN con poche unità nascoste e provare ad eseguire un elevato numero di cicli di formazione. È importante notare che, come contrariamente all’addestramento standard per le ANN, l’aumento del numero di cicli di addestramento non implica il fenomeno dell’overfitting. Ciò è dovuto alla presenza regolatrice degli iperparametri.

Una volta stabilite le condizioni più adatte per l’applicazione del modello ARD, si può osservare la relativa rilevanza delle variabili, in riferimento alla predizione della radiazione diretta:

- **L’indice di chiarezza** (rapporto tra la radiazione solare globale orizzontale che raggiunge la terra e quella extraterrestre), k_t , è l’ingresso più rilevante;
- **la massa d’aria** m_r si è al secondo posto;
- l’umidità relativa risulta essere, invece, il parametro meno influente;
- l’iperparametro riferito alla **temperatura** è alto;
- la **velocità del vento**, la **pressione**, le **precipitazioni** e la **temperatura di rugiada** sono caratterizzate da media importanza ma i relativi iperparametri sono presenti con due e tre ordini di grandezza superiori al valore dell’iperparametro corrispondente a k_t . Pertanto, l’importanza relativa di queste variabili è quasi nulla e potrebbero essere esclusi dal modello.

Le stesse simulazioni vengono riproposte con un minor numero di dati (1080h) e si dimostra che il modello ARD è affidabile anche con pochi dati in quanto gli andamenti visti sopra vengono in gran parte mantenuti. Pertanto i parametri appena citati sono da considerarsi rilevanti nella modellazione di una rete neurale per la previsione della radiazione diretta.

3.4.5. Schema riassuntivo dei principali contributi in letteratura per la previsione della radiazione globale e diretta tramite le ANN

L'analisi degli studi presenti in letteratura è servita come spunto per lo sviluppo dei modelli alle reti neurali presentati successivamente. In questa sezione vengono esaminate le peculiarità di ciascun lavoro revisionato in letteratura. In particolare, siccome l'obiettivo è quello di elaborare una metodologia per lo sviluppo di una rete neurale, sia per la radiazione globale che per la diretta, è fondamentale osservare i principali parametri utilizzati per l'architettura delle reti.

Nella Tabella III. 6, per ciascun lavoro esaminato, sono riportate le caratteristiche intrinseche della rete: tipo di network, numeri di strati e neuroni nascosti ed algoritmo di apprendimento (Renno et al. 2016).

Tabella III.6 Quadro riassuntivo analisi della letteratura (architettura ANN)

Modello	network	# strati nascosti	# neuroni nascosti	algoritmo di addestramento
<i>Azadeh et al. 2009</i>	MLP	1	4	BP con momentum, pruning e weight decay
<i>Wang et al. 2011</i>	MLP	2	18 - 13	LM
<i>Khatib et al. 2012</i>	MLP	1	-	BP
<i>Behrang et al. 2010</i>	MLP and RBF	2, 1	3 - 3, 18	LM

Modello	network	# strati nascosti	# neuroni nascosti	algoritmo di addestramento
<i>Zervas et al. 2008</i>	RBF	1	16	Fuzzy
<i>Benghanem et al 2010</i>	MLP and RBF	1,1	da 2 a 5, da 4 a 7	Approccio ai minimi quadrati
<i>Yacef et al. 2012</i>	MLP and BNN	1,1	20, 2	LM
<i>Amrouche et al.2014</i>	two MLP	2	20 - 12	BP
<i>Bilgili et al. 2011</i>	MLP	1	10	LM
<i>Mellit et al. 2013</i>	MLP	1	15	LM
<i>Kaushika et al. 2014</i>	feed-forward	1	14	BP

In Tabella III.7 per gli stessi modelli sono riportate le variabili principali di input, l'orizzonte temporale di analisi e l'obiettivo.

Tabella III.7 *Quadro riassuntivo analisi della letteratura (variabili ed obiettivi)*

Modello	variabili	orizzonte	obiettivo
<i>Azadeh et al. 2009</i>	media T massime, media T minime, precipitazioni, umidità, velocità del vento, durata soleggiamento	mensile	GR
<i>Wang et al. 2011</i>	radianza solare 6:00 am - 8:00 pm	orario	GR
<i>Khatib et al. 2012</i>	Latitudine, Longitudine, giorno dell'anno, rapporto soleggiamento	giornaliero	GR
<i>Behrang et al. 2010</i>	Media di T, umidità, velocità del vento e soleggiamento	giornaliero	GR
<i>Zervas et al. 2008</i>	Condizioni climatiche ed ore luce	giornaliero	GR
<i>Benghanem et al. 2010</i>	Giorno anno, T, durata soleggiamento ed umidità	giornaliero	GR
<i>Yacef et al. 2012</i>	T, umidità, durata soleggiamento radiazione extraterrestre	giornaliero	GR
<i>Amrouche et al. 2014</i>	T e radiazione globale orizzontale	giornaliero	GR
<i>Bilgili et al. 2011</i>	Umidità, T, velocità del vento, giorno anno	giornaliero	GR
<i>Mellit et al. 2013</i>	Radianza, T, umidità e velocità del vento	orario	DNI
<i>Kaushika et al. 2014</i>	Latitudine, Longitudine, altitudine, precipitazioni medie, umidità media, soleggiamento	mensile	DNI

Infine in Tabella III.8 sono indicati i principali vantaggi e svantaggi per ognuno dei lavori esaminati.

Tabella III.8 *Quadro riassuntivo analisi della letteratura (Vantaggi e Svantaggi)*

Modello	Vantaggi	Svantaggi
<i>Azadeh et al. 2009</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modello testato per 6 città; 2. Confronto con modello di Angstrom; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Solo analisi mensile; 2. Basse performance per alcune città (e.g. Zahedan);
<i>Wang et al. 2011</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pretrattamento dei dati; 2. Analisi dell'errore per scegliere la migliore configurazione ANN; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. No applicazioni e confronti; 2. Mancanza di test per alcuni luoghi;
<i>Khatib et al. 2012</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Basso numero di input (4); 2. Dati da vari luoghi per training e test; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Misura indiretta della GR usando l'indice di chiarezza; 2. Poca accuratezza (high MSE);
<i>Behrang et al. 2010</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Differenti combinazioni di input; 2. Confronto tra differenti modelli di previsione; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modello testato solo per Dezful (Iran);
<i>Zervas et al. 2008</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Minori input richiesti; 2. Analisi di correlazione Tra input e output usando la funzione Gaussiana; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Definizione soggettiva delle condizioni climatiche; 2. Modello testato solo per un luogo;
<i>Benghanem et al 2010</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Basso nRMSE; 2. Sviluppo di applicazione per stimare la taglia di un sistema PV; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modello testato solo per Al-Madinah (Saudi Arabia); 2. La scelta della topologia non viene esaminata;

Modello	Vantaggi	Svantaggi
<i>Yacef et al. 2012</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sviluppo di una diversa ANN (BNN); 2. Confronto tra BNN, MLP e modelli empirici; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modello testato solo per una località;
<i>Amrouche et al. 2014</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modello testato per 2 località; 2. Fase di training condotta con dati per vari luoghi (4); 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nessuna applicazione;
<i>Bilgili et al. 2011</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sviluppo di differenti modelli MLP, MLR, NMLR; 2. Valutazione della rilevanza degli input con il metodo "Stepwise"; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modello testato solo per Adana (Turkey);
<i>Mellit et al. 2013</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modello per radiazione globale e diffusa 2. Confronto tra modello feed-forward e modello adattivo; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bassi valori di R^2; 2. Modello testato solo per Jeddah (Saudi Arabia);
<i>Kaushika et al. 2014</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Accurata stima della DNI; 2. Sviluppo del modello con dati di molte stazioni; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Stima indiretta della DNI usando l'indice di chiarezza; 2. Alto numero di input;

Come si può osservare, le architetture scelte prevedono quasi sempre una rete MLP, con algoritmo di apprendimento di LM. Si può ancora notare come si tende a non superare due strati di neuroni nascosti ed a ridurre il numero di neuroni per ciascuno strato.

Le analisi condotte sono al massimo giornaliere, raramente si scende nel dettaglio orario ed inoltre, la DNI è quasi sempre analizzata tramite l'indice di chiarezza, ma mai in maniera diretta con le ANN.

Infine, grande attenzione da parte di tutti gli autori revisionati in letteratura viene posta sulle variabili di input. In particolare, si usano differenti combinazioni di input oppure si cerca di sfruttare dei metodi per la scelta ottimale del set di variabili in ingresso. L'obiettivo è quello di selezionare gli input più rilevanti per l'analisi, tentando di ridurre il numero al fine di evitare di dover trattare dati che non portano contributi significativi alla risoluzione del problema. L'attenzione posta su tale fase di modellazione della rete rappresenta uno dei punti chiave dei modelli alle reti neurali sviluppati nel corso di questo capitolo.

3.5. Introduzione alla metodologia sviluppata

Al fine di fornire uno strumento di previsione della radiazione globale e diretta sono stati analizzati, nei paragrafi precedenti, la teoria alla base delle reti neurali e diversi articoli scientifici che potessero fornirci linee guide nella metodologia da applicare ed allo stesso tempo fungere da riferimento con cui effettuare benchmarking.

Lo strumento di previsione costruito si classifica come metodo alternativo per la conoscenza del potenziale e, allo stesso tempo, definisce le potenzialità che la tecnologia fotovoltaica e fotovoltaica a concentrazione hanno all'interno del territorio preso in considerazione visti i valori, quantitativamente incoraggianti, di radiazione riportati. Inoltre, la metodologia sviluppata vuole fornire uno strumento di analisi per i sistemi basati su energia solare che può essere sfruttato in mancanza di una campagna di misure sperimentali.

Nello specifico, la conoscenza dei valori di irraggiamento diretto, requisito imprescindibile per la valutazione di un investimento nel campo del fotovoltaico a concentrazione, non è facilitata dalla creazione di molti strumenti affidabili a cui fare riferimento.

Il modello riportato si pone come alternativa ai tradizionali strumenti di conoscenza della radiazione nella sua parte diretta. Questo discorso si rafforza se consideriamo le approssimazioni che i modelli di decomposizione, generalmente usati in assenza di dati di radiazione diretta, portano, vista la complessa relazione che unisce l'indice di chiarezza e la trasmittanza solare diretta.

In conclusione, questi strumenti forniscono previsioni per la radiazione globale e diretta e perciò si configurano utili in ogni campo. Un esempio può essere considerato pensando al sistema elettrico nazionale dove è necessario garantire il bilanciamento dell'energia consumata con quella prodotta.

I modelli che ci consentiranno di fornire una previsione accurata sono basati sull'utilizzo delle reti neurali, strumento di provata efficacia nella sintesi di correlazioni non lineari tra variabili.

Pertanto, la modellazione presentata in questa sezione, da un lato permette di risolvere il problema menzionato al Capitolo 2, inerente la corretta stima dell'input da cui partire per il dimensionamento di un qualsiasi sistema solare. Da un altro punto di vista, essa consentirà, una volta provata nei Capitoli successivi, la bontà delle stime ottenute da tali modelli, di analizzare l'output energetico dei sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione.

La metodologia presentata in questa sezione, insieme ai risultati proposti nel Capitolo 6, sono stati oggetti di differenti pubblicazioni su riviste internazionali (Renno et al., 2015), (Renno et al., 2016 b).

3.6. Metodologia adottata per lo sviluppo di modelli ANN per la previsione del potenziale solare per una determinata località

In questa sezione sono definiti tutti i passaggi seguiti per la modellazione di due differenti reti neurali per la previsione della radiazione globale e diretta.

La modellazione ANN per la mappatura dei problemi non lineari richiede l'attuazione di diverse fasi. Ogni fase è caratterizzata dalla scelta delle caratteristiche che impattano sia sui passaggi precedenti che successivi. La progettazione ANN comporta la definizione degli ingressi, il tipo di funzioni di rete, la topologia, paradigma di training e funzioni di trasferimento. In particolare, il processo di modellazione può essere sostanzialmente diviso in tre fasi:

1. Il primo considera la progettazione della topologia della rete tenendo conto dei parametri di input, il tipo di ANN, il numero di strati nascosti e neuroni. Questa fase prevede anche la scelta dell'algoritmo di training, le funzioni di trasferimento ed set di training e validazione.
2. Il secondo passo costituisce la fase di formazione dove i set di dati sono forniti ai modelli ANN per adeguare pesi e biases come funzione di una condizione predeterminata.
3. L'ultimo passo è la validazione, dove i modelli ANN sono testati con un nuovo set di dati e la loro accuratezza può essere valutata mediante parametri statistici.

La metodologia sviluppata si basa su due aspetti principali. Il primo è legato all'uso di un insieme eterogeneo di variabili di input non convenzionali come variabili meteorologiche, radiometriche, astronomiche e parametri geografici per la previsione della radiazione sia globale che diretta, trattata successivamente.

Nello specifico, la definizione degli input è stata analizzata preliminarmente allo scopo di osservare l'impatto delle principali variabili sull'obiettivo, ovvero la radiazione globale nel primo caso e la radiazione diretta nel secondo.

Il secondo aspetto, considera l'architettura di rete; di conseguenza, ogni modello è eseguito dopo il training per validare diverse configurazioni, nello specifico sono state selezionate nove diverse configurazioni topologiche.

Generalmente, le funzioni coinvolte nel processo di ricombinazione sono il tipo di funzione di trasferimento, il numero di livelli nascosti e il numero

di neuroni nascosti. Tutte queste configurazioni sono caratteristiche per una rete feed-forward, come la MLP.

I dati di training, validazione e test sono stati ottenuti da misure sperimentali e banche dati per posizioni diverse. La precisione dei modelli viene valutata mediante i risultati di convalida per le nove configurazioni di rete. Gli indicatori statistici utilizzati per il confronto sono l'errore quadratico medio (MSE), lo scarto quadratico medio (RMSE), la misura assoluta dell'errore percentuale (MAPE), l'errore medio assoluto (MAE) e la bontà di adattamento (R^2).

Le migliori configurazioni sia per la radiazione globale che per la diretta vengono testati con diverse serie di dati ed i risultati vengono confrontati con i modelli presenti in letteratura.

L'obiettivo è quello di elaborare uno strumento di previsione per la definizione del potenziale solare, inteso come analisi di radiazione globale e diretta per una determinata località. Nell'elaborato, la località obiettivo fissata è il campus di Salerno (Fisciano, $40^{\circ}46'23''N$, $14^{\circ}47'52''E$). Per poter costruire uno strumento che permettesse l'analisi di qualsiasi località, sono stati raccolti i dati da differenti stazioni. In Figura III. 28 sono indicate la località obiettivo e le differenti stazioni di misura, di cui si discuterà in seguito.

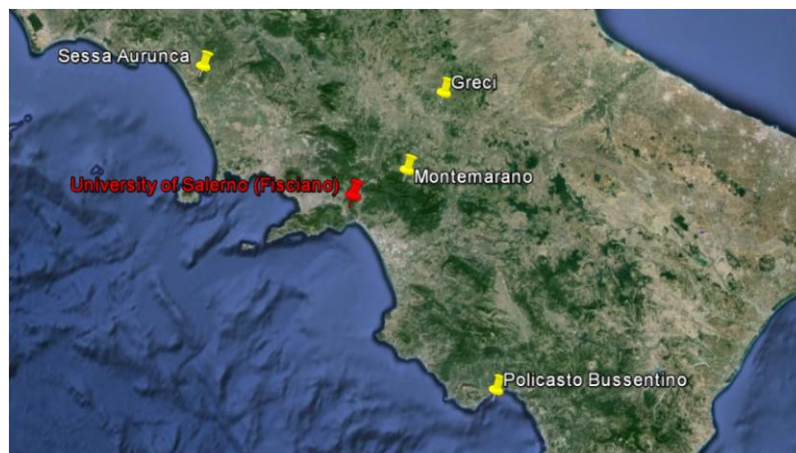


Figura III. 28 Località target e stazioni di misura considerate

3.6.1. Flow – chart e punti salienti della modellazione per la definizione delle ANN

Nel paragrafo precedente sono state delineate le linee guide per la definizione dei modelli di rete neurale per la previsione della radiazione

globale e diretta per uno specifico target. In questa sezione, possiamo analizzare nello specifico tutti i punti salienti dell'analisi, come riportati nella Figura III.29.

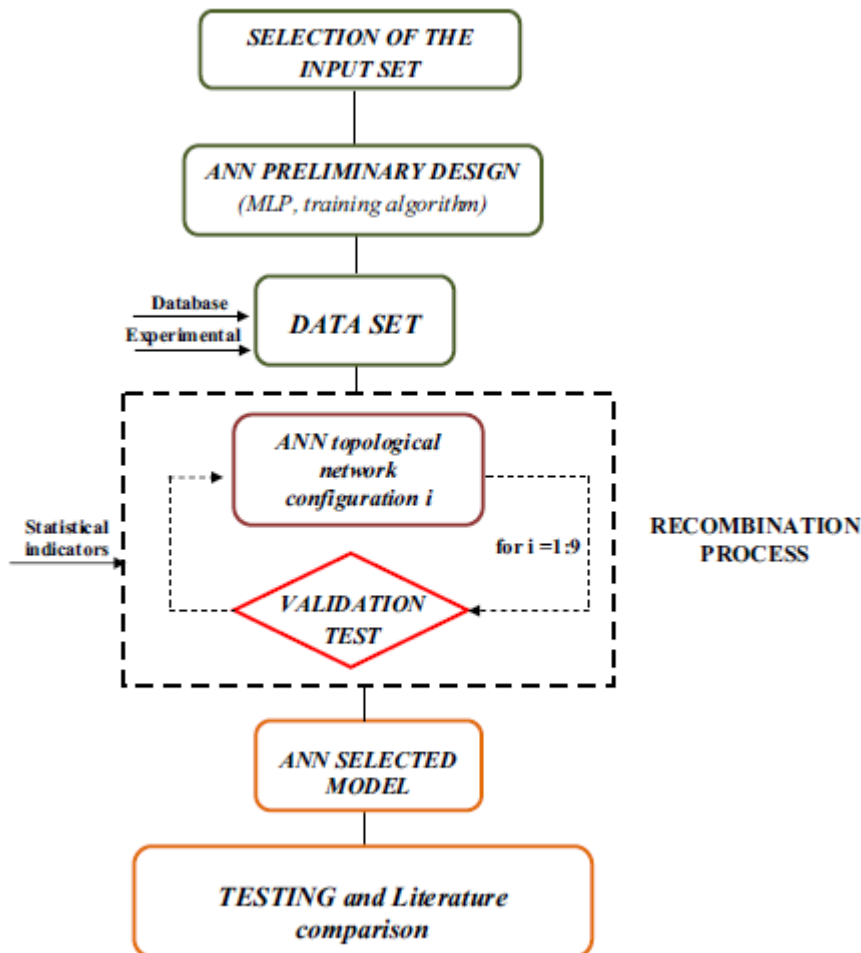


Figura III.29 Flow – chart della metodologia

In particolare le principali fasi sono:

- **Definizione delle variabili di input:** come osservato dall'analisi della letteratura, più variabili si adottano e più la rete non potrebbe generalizzare correttamente il problema, fornendo risultati buoni solo per i valori del set di variabili impostato. Pertanto è fondamentale un'analisi per stabilire quali siano le variabili maggiormente collegate al problema.

- **Definizione dei dati e trattamento:** è fondamentale reperire i dati per tutte le fasi di sviluppo della rete. I dati vanno trattati sia in ingresso che in uscita.
- **Definizione della struttura generale della rete:** si sceglie il tipo di rete e la regola di apprendimento.
- **Definizione topologica della rete:** si impostano tutte le possibili scelte in termini di numero di strati nascosti, numero di neuroni negli strati nascosti, funzioni di trasferimento, ciò costituisce quello che è il processo di ricombinazione.
- **Sviluppo della rete nelle varie configurazioni topologiche:** tale fase coinvolge i tre step analizzati in precedenza: addestramento, validazione e test, per ciascuna configurazione
- **Scelta delle reti basata su validazione statistica:** si definiscono i principali parametri di valutazione.
- **Test delle reti scelte su nuovi dati.**
- **Confronti con la letteratura.**

La definizione e validazione delle reti porta, poi, come vedremo nei paragrafi successivi ad impiegare le previsioni il dimensionamento dei sistemi a concentrazione e le stime di producibilità.

3.6.2. Scelta delle variabili di input

Sia il modello ANN per la radiazione globale che quello per la radiazione diretta, sfruttano un set di variabili eterogenee. In questo modo, si vuole definire un insieme di parametri che permetta di caratterizzare la posizione geografica, le proprietà climatiche, meteorologiche e radiometriche per il target selezionato. Pertanto, la scelta degli input rappresenta il primo aspetto esaminato in quanto essa permette la successiva fase di analisi topologica della rete. Dai dati raccolti, come vedremo in seguito, si è proceduto ad un'attenta analisi statistica basata sulle serie storiche, in modo da scegliere il numero ed il tipo di variabili in ingresso.

Le serie storiche rappresentano una collezione di osservazioni ordinate nel tempo, ognuna delle quali viene registrata per uno specifico intervallo temporale. In prima approssimazione, un modello alle serie storiche dovrebbe assumere che le combinazioni passate si riproporranno nel futuro. Infatti, i modelli alle serie storiche permettono di ottenere una riproposizione sintetica dei valori analizzati, statisticamente simile a quella originale. Tali modelli, in primo luogo, prevedono la definizione di uno strumento matematico per l'analisi dei dati. Le reti neurali, in questo senso, avendo la capacità di imparare, memorizzare e creare relazioni, si presentano come strumenti non lineari per la modellazione alle serie storiche (Voyant et al., 2013). Al fine di determinare quali dei parametri, endogeni ed esogeni al problema, debbano essere considerati nel modello di reti neurali, viene

Capitolo 3

eseguita un'analisi dei correlazione rispetto al target, per tutte le variabili di input.

La correlazione tra due variabili riflette il grado con cui ciascuna di esse è legata all'altra. La misura di correlazione più comune è quella di Pearson. Un valore di correlazione +1 (o -1) significa che tra le due variabili c'è una relazione lineare positiva (o negativa) perfetta. Un valore pari a zero, invece, implica che non c'è correlazione tra le variabili. Il coefficiente di Pearson (R), è definito tramite la varianza e la covarianza tra le due variabili considerate. Considerando una serie di valori dei due parametri analizzati, il coefficiente R è dato da:

$$R = \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2 \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}} \quad (\text{III.44})$$

L'importanza di ciascuna variabile di ingresso x è stata correlata con l'output di interesse y. Nello specifico per ciascuno dei due modelli, l'output di interessa sarà la radiazione globale giornaliera (GR) e la radiazione diretta oraria (DNI).

Quindi solo dopo aver scelto le variabili di input, tramite lo studio della correlazione, si può passare all'a fase successiva di configurazione delle reti.

É fondamentale anche stabilire il numero di input, in questo caso, una volta selezionate le variabili che, di volta in volta, sono coinvolte nella rete, viene fatta un'analisi statistica per la definizione del loro numero basata sullo scarto quadratico medio normalizzato (nRMSE).

Le principali variabili analizzate per la rete neurale finalizzata alla previsione della radiazione globale sono:

1. latitudine (Lt);
2. longitudine (LG);
3. temperatura media (T),
4. la durata del soleggiamento (SD);
5. la precipitazione totale (Pr);
6. le ore diurne (H);
7. angolo di declinazione (δ);
8. velocità del vento (WS);
9. umidità relativa (Hu).

Per la rete neurale con obiettivo la previsione della DNI oraria avremo invece:

1. angolo orario (HRA);
2. indice di chiarezza (k_t);
3. radianza normale globale (G_{ni});
4. angolo di declinazione (δ).

3.6.3. *Raccolta dati*

Per lo sviluppo di una rete neurale è di fondamentale importanza utilizzare dati:

- **Completi:** le istanze del database devono essere complete in ogni sua modalità all'interno dell'intervallo di tempo considerato.
- **Corretti:** ogni modalità con cui il dato si presenta deve essere fedele alla realtà rappresentata in quello specifico momento. Al fine di garantire ciò è necessario rintracciare fonti autorevoli e affidabili oppure organizzare una campagna di rilevazioni delle grandezze d'interesse.
- **Chiari:** non deve essere possibile incappare in una non univocità del dato.

Tali caratteristiche sono necessarie in quanto la rete apprende da questi dati le correlazioni esistenti tra gli input e gli output, nella fase di addestramento. Perciò la qualità dei dati, spesso, coincide con la qualità del modello. Inoltre, è importante che i dati coprano il range di input per cui la rete sarà usata. Infatti, per le reti MLP, la capacità di generalizzazione viene ben acquisita quando il range dei dati di addestramento coincide con il full range dell'input.

Lo sviluppo dei nostri modelli ha previsto l'impiego di:

1. Dati ottenuti da database per un periodo di circa tre anni (2013 – 2015);
2. Dati sperimentali.

Per l'ottenimento della maggior parte delle grandezze medie giornaliere di natura climatica abbiamo utilizzato il database messo a disposizione dal C.A.R. (centro agrometeorologico regionale) della regione Campania. In particolare, abbiamo attinto, da questo database la latitudine, la longitudine, la temperatura media ambiente, le precipitazioni e la radiazione globale. Ulteriori valori sono stati ottenuti da alcuni studi statistici dell'Osservatorio dell'Aeronautica militare.

I dati sperimentali sono stati raccolti attraverso una stazione allestita all'Università degli studi di Salerno, l'impianto sperimentale di misura è descritto nel Capitolo 5. Esso ha permesso di ottenere valori di temperatura, radiazione globale e diretta.

3.6.4. *Pre e post – processing dei dati*

La raccolta dei dati ha permesso di avere valori completi, corretti e chiari. L'ultimo passaggio da effettuare per poter ultimare lo sviluppo della rete

Capitolo 3

neurale è quello di trattamento dei dati forniti alla rete. Questa pratica appartiene alla fase di pre – processing dei dati che consente, a valle di essa, di ottenere un addestramento più efficiente.

Il trattamento dei dati rappresenta un punto chiave al fine di costruire un modello ANN in quanto si impiega un grande ammontare di informazioni provenienti da differenti stazioni di misura per diversi anni. In questo modo, i dati impiegati permetteranno una fase di addestramento che comporta l'acquisizione, da parte della rete, di una rapida capacità di generalizzazione.

In particolare, valori non normali, ovvero outlier, devono essere esclusi. Questo insieme di valori rappresenta dati che sono completamente differenti dagli altri. Pertanto, essi non devono essere considerati al fine di evitare una non corretta influenza nella fase di addestramento.

Come suggerito da Muneer (Muneer, 2004), gli outlier devono essere esclusi colcolandone il terzo percentile e considerando il seguente range:

the outliers have been excluded calculating the first and third percentile, and evaluating the following data range:

$$[Q_1 - k(Q_3 - Q_1), Q_3 + k(Q_3 - Q_1)] \quad (\text{III.45})$$

dove Q_i rappresenta il percentile e k è un valore costante, fissato a 1.5. I dati che non sono inclusi nel range così definito, non devono essere inclusi poiché risultano outlier.

In seguito i dati vengono normalizzati nel range $[-1,1]$. La normalizzazione rappresenta un strumento efficace quando viene considerato un gran numero di dati senza outlier. Infatti, la presenza di outliers potrebbe condurre ad un errato addestramento in quanto la maggior parte dei dati si concentrerebbe in un range piccolo. L'uso della normalizzazione piuttosto che della standardizzazione permette di evitare il problema legato alle unità di misura delle variabili in ingresso. Inoltre, sfruttando la funzione sigmoide, durante l'addestramento, è necessario avere a disposizione un range di valori limitato in quanto tale funzione raggiunge il suo asintoto con un input uguale a 3 o -3. Pertanto, quando i valori di input sono maggiori di 3, all'inizio della fase di addestramento, il gradiente è molto piccolo e la formazione della rete sarà molto lenta (Azadeh et al. 2008; Wang et al. 2011). La presenza di valori non normali nei dati iniziali è dovuta a due principali motivazioni. La prima dipende dai database, che possono essere condizionati dalla presenza di dati che hanno errori durante la misurazione. La seconda è legata alla stazione di misura allestita all'Università di Salerno; infatti per alcuni periodi le misure rilevate sono state anomale a causa di problemi con la strumentazione.

Attraverso la funzione di Matlab “mapminmax”, viene definito all'inizio l'intervallo di normalizzazione $[-1,1]$. Alla fine della fase di testing, la stessa

funzione è impiegata per il post – processing dei dati, in modo da riportare gli output nel dominio originale.

In Figura III.30 sono riportati i processi di pre e post – processing.

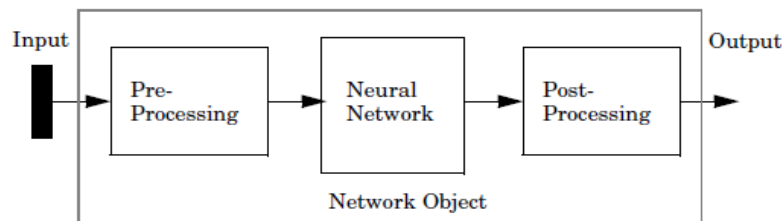


Figura III.30 Schema di pre e post – processing

3.6.5. Tipo di rete, configurazione topologica e validazione

statistica

La tipologia di rete definisce le caratteristiche e le modalità di definizione della rete. I modelli ANN per la previsione della radiazione globale e diretta elaborati in questo lavoro sono costituiti da un'architettura feed – forward. In particolare, la rete utilizzata è una rete MLP. La bontà della rete MLP è spiegata dall'abilità che essa presenta nell'imparare complesse relazioni tra i pattern di input e di output. L'ultima caratteristica di rete che deve essere fissata è quella inerente all'algoritmo di addestramento.

Quest'ultimo definisce le regole secondo le quali vengono calcolati i pesi all'interno della rete, in maniera che essa restituisca le risposte desiderate con la maggiore precisione possibile. Si è scelto di utilizzare un paradigma di apprendimento supervisionato di tipo back – propagation. L'apprendimento è supervisionato perché sono disponibili dati di training, mentre si sceglie la back – propagation in quanto, per le reti MLP, essa fornisce le migliori prestazioni. Gli algoritmi basati sulla back – propagation sono abbastanza numerosi. La scelta della migliore soluzione è stata ottenuta applicando la cross – validation.

Analizzando la letteratura abbiamo innanzitutto evidenziato che, quando viene utilizzata una MLP, si adopera sempre la back – propagation dell'errore. Inoltre, lo specifico algoritmo che viene utilizzato più spesso è quello Levenberg – Marquardt (LM), in quanto fornisce ottime performance nel campo del fitting function ed è indicato per reti non troppo grandi. Nel nostro caso, l'algoritmo di LM è stato confrontato con il gradient descent con momentum e weight decay. La valutazione dei due algoritmi è stata effettuata con due simulazioni separate, stimando in entrambi i casi l'errore quadratico medio (MSE), definito come:

Capitolo 3

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{III.46})$$

dove n è la cardinalità dell'insieme coinvolto, y_i è la variabile da stimare, \bar{y} è il valore medio di y_i e \hat{y}_i è il valore calcolato dal modello. In Tabella III.9 vengono indicati i valori dell'MSE ottenuti, in modo da poter compiere la scelta.

Tabella III.9 Scelta dell'algoritmo di apprendimento

Algoritmo apprendimento	MSE
GD con momentum e weight decay	0.004578
Levenberg-Marquardt	0.001492

Dopo aver scelto le variabili ed aver stabilito preliminarmente l'architettura della rete, costituita da una MLP con algoritmo di apprendimento di LM, come è stato definito in Figura III.29, la metodologia segue un attento processo di ottimizzazione per la scelta della migliore configurazione delle reti neurali.

Generalmente, le figure coinvolte nel processo di ricombinazione sono: il tipo di funzioni di trasferimento, il numero di strati nascosti ed il numero di neuroni nascosti. Tutte queste configurazioni prevedono la presenza di una MLP. Nello specifico, vedremo per ciascun modello quali sono i tipi di funzioni ed i numeri di strati e neuroni nascosti coinvolti. Tutte le scelte nel processo di ricombinazione, così come la valutazione finale del modello scelto dopo le fasi di addestramento, validazione e test, sono effettuate attraverso la stima di differenti indicatori statistici.

Gli indicatori coinvolti, come già accennato, oltre all'errore quadratico medio (MSE), sono: lo scarto quadratico medio (RMSE), la misura assoluta dell'errore percentuale (MAPE), l'errore medio assoluto (MAE) e la bontà di adattamento (R^2):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (\text{III.47})$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i} \quad (\text{III.48})$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (\text{III.49})$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{III.50})$$

dove, come detto, n è la cardinalità dell'insieme coinvolto, y_i è la variabile da stimare, \bar{y} è il valore medio di y_i e \hat{y}_i è il valore calcolato dal modello.

Il MAPE determina l'accuratezza del modello e l'RMSE rappresenta la deviazione standard tra i valori predetti e quelli reali; esso è un buon parametro per comparare l'errore di previsione di differenti modelli legati alla stessa variabile. Il MAE misura come i valori predetti sono vicini a quelli osservati, mentre R^2 calcola il rapporto tra la variazione valutata con un modello di regressione e la semplice varianza dei dati. Quest'ultimo indicatore è un parametro

Tramite questo processo si ottengono le migliori configurazioni sia per la GR giornaliera che per la DNI oraria. Queste reti vengono poi testate con nuovi dati e confrontate con le previsioni dei modelli in letteratura.

Analizziamo ora nello specifico i modelli per la previsione della radiazione globale e diretta ottenuti seguendo la metodologia appena esposta, tutti i risultati ottenuti ed i confronti con la letteratura sono poi riportati nel Capitolo 6.

3.7. Modelli ANN sviluppati per la previsione della radiazione

globale (GR) giornaliera e per la radiazione diretta (DNI) oraria

In questa sezione, alla luce della metodologia descritta precedentemente, vengono illustrati gli elementi principali impiegati per la definizione delle reti neurali finalizzate alla previsione del potenziale solare. Come detto, l'obiettivo principale di questa fase è quello di sviluppare un accurato modello di previsione della GR giornaliera e della DNI oraria, al fine di poter valutare il potenziale di sistemi solari in differenti località. Per tale scopo, si è scelto come target, la previsione per l'Università di Salerno (Fisciano, 40°, 46'23''N, 14°47'52''E). Il lavoro è stato condotto impiegando il tool delle reti neurali di MATLAB (Matlab, LTD).

Per entrambi i modelli implementati, l'architettura della rete neurale è costituita da una rete MLP di tipo feed – forward, addestrata tramite l'algoritmo di Levenberg e Marquardt. La regola di apprendimento adottata per le due MLP è la back – propagation (BP). Tale algoritmo calcola il gradiente dell'errore della rete riferito ai suoi pesi. L'approccio BP può essere implementato considerando differenti topologie e funzioni di trasferimento.

Ciò costituisce un problema tipico durante lo sviluppo di una rete neurale, e viene risolto attraverso l'impiego della cross – validation. Tale strumento rappresenta una tecnica di validazione che permette di stimare come un modello generalizza un'insieme di dati indipendenti. Prima di tutto, come

Capitolo 3

visto, sono state scelte le variabili di input sfruttando il fattore di correlazione R e le serie storiche; in seguito, anche il numero di variabili di ingresso è stato scelto attraverso un confronto statistico basato sullo scarto quadratico medio normalizzato (nRMSE).

Una volta definito l'insieme di input, nove differenti configurazioni sono state analizzate, attraverso un processo di ricombinazione, per entrambe le ANN. In questo modo si è potuto valutare la configurazione che presentasse le migliori performance predittive.

L'architettura della rete ed il tipo di paradigma di apprendimento sono stati definiti sfruttando la cross – validation e la stima dell'errore quadratico medio (MSE). I risultati, come visto nel paragrafo precedente, hanno portato ad una MLP con algoritmo di apprendimento LM e back – propagation.

Il tipo di funzione di trasferimento, il numero di strati nascosti ed il numero di neuroni nascosti sono stati variati, nel processo di ricombinazione, considerando un'insieme plausibile di possibilità.

Le differenti coppie di funzioni di trasferimento, per lo strato di neuroni nascosto e per lo strato di output, sono state scelte con riferimento alla letteratura riportata. Infatti, ad esempio, per lo strato di uscita la funzione solitamente impiegata è quella lineare. Al contrario, la funzione di trasferimento per lo strato nascosto, è spesso una funzione non lineare. Pertanto, la funzione sigmoide è stata selezionata, in quanto permette migliori risultati rispetto alla tangente iperbolica (\tanh). Ciò è stato osservato attraverso i risultati di alcune simulazioni condotte in MATLAB (R2007, *The Mathworks*), dove le reti confrontate erano le stesse, tranne che per la funzione di trasferimento dello strato nascosto.

La coppia di funzioni \tanh - \tanh , è stata impiegata nel processo di ricombinazione perché, dopo alcuni test e valutando l'MSE, tale coppia presentava i migliori risultati rispetto a qualsiasi altra coppia di funzioni, dove almeno una era non lineare.

Infine, considerando l'impiego di uno o due strati nascosti, in base ai risultati del teorema di approssimazione universale, molteplici combinazioni di funzioni di trasferimento sono state investigate, valutando due strati nascosti e sfruttando differenti simulazioni MATLAB.

Tali simulazioni hanno analizzato il trend dell'errore quadratico medio ed il suo valore finale. Alla fine la combinazione \tanh - \tanh è risultata, ancora una volta, la migliore combinazione, soprattutto in riferimento al primo e secondo strato di neuroni nascosti.

Al contrario, per quanto concerne il numero di neuroni nascosti, sia per la rete che prevede la GR, sia per la rete che stima la DNI, è stato impostato inizialmente un numero di neuroni basso, pari ad otto. Inoltre, in questo caso, si è visto come fosse meglio che il numero di neuroni nascosti fosse concentrato in un solo strato. In questo senso, l'MSE aumentava sia aumentando il numero di neuroni (le ultime simulazioni hanno visto la presenza di dodici neuroni), sia aumentando il numero di strati.

Ripetendo varie combinazioni tra numero di neuroni e strati nascosti e funzioni di trasferimento, nove possibili configurazioni topologiche sono state definite per entrambe le reti.

I dati pre e post trattati, sono stati raccolti tra il 2013, 2014 e 2015 sfruttando valori di database e misure sperimentali per differenti località.

I dati sono suddivisi in tre sottoinsiemi, il primo rappresenta l'insieme di addestramento utilizzato per calcolare il gradiente e per aggiornare i pesi mediante l'algoritmo di apprendimento. Il secondo è il set di validazione che calcola l'errore evitando overfitting; l'early stopping è la tecnica utilizzata per migliorare la capacità di generalizzazione. Tale tecnica salva i pesi e di bias della rete quando si raggiunge il minore valore di errore di validazione.

La fase di valutazione porta alla fine del processo di ricombinazione. I risultati ottenuti da tale step, permettono di portare avanti una sola rete per entrambi i modelli. La migliore configurazione topologica viene poi testata sul terzo insieme di dati (il test set), al fine di confermare la capacità predittiva della rete.

In questo Capitolo, vediamo quindi, i modelli per ciascuna rete, con la scelta delle variabili di input e delle configurazioni topologiche. I risultati del processo di ricombinazione e della fase di test sulle migliori configurazioni sono poi riportati nel Capitolo 6.

3.7.1. Implementazione del modello ANN per la previsione della radiazione globale giornaliera

La previsione della radiazione globale (GR) giornaliera è stata realizzata attraverso l'impiego di database e valori da differenti stazioni di misura con l'obiettivo di valutare come sito obiettivo i valori per l'Università di Salerno, come riportato in Figura III.28.

In particolare, i valori considerati includono un mix di valori di variabili climatiche e meteorologiche, ottenuti dal Centro Agro – meteorologico della regione Campania (Regione Campania, 2014), riferiti a quattro specifiche località: Sessa Aurunca (41°14'N, 13°56'E), Greci (41°15'10''N, 15°10'12''E), Montemarano (40°54'58''N, 14°59'54''E) e Policastro Bussentino (40°04'06''N, 15°31'05''E).

Le misure sperimentali, impiegate principalmente per la costruzione degli insiemi di validazione e test, sono stati ottenuti tramite un piranometro con range di misura ed range spettrale rispettivamente pari a 0-2000 W/m² e 335-2200 nm, ed una termo – resistenza di platino, come descritto nel Capitolo 5.

La definizione del set di input costituisce un fattore strategico nell'implementazione del modello. L'analisi di correlazione per le variabili di input, al fine di prevedere la GR giornaliera, è riportata in Tabella III.10.

Tabella III.10 *Analisi di correlazione per gli input del modello GR*

Variabili	Correlazione (R)
Latitudine (Lt)	0.241
Longitudine(Lg)	0.241
Temperatura media (T)	0.667
Soleggiamento (SD)	0.974
Precipitazioni (Pr)	-0.767
Angolo di declinazione (δ)	0.788
Ore diurne (H)	0.786
Umidità (Hu)	-0.611
Velocità del vento (WS)	-0.524

In particolare, è stato considerato un'insieme di nove parametri eterogenei: latitudine (Lt), longitudine (Lg), temperatura media (T), durata del soleggiamento (SD), precipitazione totale (Pr) ore diurne (H), angolo di declinazione (δ), velocità del vento (WS) ed umidità relativa (Hu).

Come riportato in Tabella III.10, la variabile che impatta maggiormente, che quindi ha il più alto indice di correlazione, è la durata del soleggiamento. Tale parametro rappresenta una variabile radiometrica e fornisce un'indicazione circa la nuvolosità del luogo considerato (Yadav e Chadel, 2012). La durata del soleggiamento è definita come la somma dei sotto periodi in cui l'radianza solare supera i 120 W/m^2 (Benghanem e Joraid, 2007). Al fine di definire un modello per la GR per differenti luoghi, variabili geografiche come la latitudine e la longitudine sono state incluse nel set iniziale, anche se la loro correlazione è abbastanza bassa.

La velocità del vento, l'umidità e le precipitazioni, di solito, permettono di caratterizzare la situazione meteorologica (Wang et al., 2011). Tuttavia, la velocità del vento e l'umidità presentano i valori di correlazione più bassi, pertanto risultano le meno incidenti e quindi non sono state considerate.

Infine, due variabili astronomiche come le ore diurne e l'angolo di declinazione sono state valutate positivamente nel loro impatto rispetto alla GR. La prima definisce il periodo dell'anno che la misura prende in considerazione, inoltre fornisce un'importante informazione relativa alla nuvolosità, specialmente se impiegata in coppia con la durata del soleggiamento. La seconda permette di definire lo specifico giorno dell'anno considerato. Come visto in precedenza, tali variabili sono valutate attraverso espressioni analitiche (Renno e Petito, 2013).

Una volta definite le variabili di input, in base al valore di correlazione, è stato scelto il loro numero. Diverse reti neurali sono state addestrate e validate cambiando in numero dei parametri di input e valutando lo scarto quadratico medio normalizzato (nRMSE). In Tabella III.11 tutte le

combinazioni delle variabili in ingresso sono riportate con il rispettivo valore di nRMSE. Si può osservare come la rete con sette input (latitudine (Lt), longitudine (Lg), temperatura media (T), durata del soleggiamento (SD), precipitazione totale (P) ore diurne (H), angolo di declinazione (δ)), ottiene i migliori risultati per il modello della GR giornaliera. Pertanto, la radiazione giornaliera può essere scritta come:

$$GR = f(Lt, Lg, T, SD, P, H, \delta) \quad (\text{III.51})$$

Tabella III.11 Numero di input e nRMSE per il modello GR

	# Input	Input	nRMSE
1	5	Lt, Lg, SD, T, Pr	0.090
2	5	Lt, Lg, SD, T, δ	0.095
3	5	Lt, Lg, SD, T, H	0.106
4	5	Lt, Lg, δ , T, H	0.143
5	5	Lt, Lg, Pr, T, H	0.154
6	6	Lt, Lg, SD, T, Pr, δ	0.043
7	6	Lt, Lg, SD, T, Pr, H	0.050
8	6	Lt, Lg, δ , T, Pr, H	0.063
9	6	Lt, Lg, δ , T, Pr, SD	0.069
10	6	Lt, Lg, SD, T, δ , H	0.046
11	6	Lt, Lg, SD, T, δ , Hu	0.066
12	6	Lt, Lg, SD, T, δ , WS	0.092
13	6	Lt, Lg, SD, T, H, Hu	0.087
14	6	Lt, Lg, SD, T, H, WS	0.101
15	6	Lt, Lg, SD, T, Hu, W	0.134
16	7	Lt, Lg, SD, T, Pr, δ , H	0.018
17	7	Lt, Lg, SD, T, Pr, δ , Hu	0.055
18	7	Lt, Lg, SD, T, Pr, δ , WS	0.089
19	7	Lt, Lg, SD, T, δ , H, Hu	0.072
20	7	Lt, Lg, SD, T, δ , H, WS	0.092
21	7	Lt, Lg, SD, T, H, Hu, WS	0.105

Una volta definito il set di input, varie configurazioni topologiche sono state addestrate e validate modificando alcune caratteristiche intrinseche della rete. In particolare, per questo modello sono stati scelti un set di addestramento con dati per dieci mesi ed un set di validazione con valori per

Capitolo 3

tre mesi. Come detto in precedenza, nove configurazioni sono implementate: da GR1 a GR9 come riportato in Tabella III.12.

Tabella III.12 *Differenti configurazioni topologiche per la rete neurale GR*

Topologia della rete	Funzioni di trasferimento	# di strati nascosti	# di neuroni nascosti
GNT 1	sigmoide – lineare	1	8
GNT 2	sigmoide- lineare	1	10
GNT 3	sigmoide – lineare	1	12
GNT 4	tanh – tanh	1	8
GNT 5	tanh – tanh	1	10
GNT 6	tanh – tanh	1	12
GNT 7	tanh - tanh – lineare	2	6 - 4
GNT 8	tanh - tanh – lineare	2	5 - 3
GNT 9	tanh - tanh - lineare	2	7 - 5

Il numero di strati nascosti, di neuroni nascosti ed il tipo di funzioni di trasferimento sono stati modificati al fine di ottenere un accurato modello di previsione.

Le soluzioni proposte prevedono principalmente uno o due strati nascosti, mentre le funzioni di trasferimento impiegate sono la sigmoide, la tangente iperbolica (tanh) e la lineare. Tali funzioni descrivono il modo in cui il flusso delle informazioni va dallo strato di input agli strati nascosti e, dagli strati nascosti allo strato di output.

La migliore configurazione, risultante dall'analisi statistica, è stata poi testata su differenti set. Un primo insieme di test considera i dati raccolti per l'Università di Salerno nei mesi di Marzo, Luglio e Novembre 2014. Al fine di provare le buone capacità predittive del modello, altri test set sono stati impiegati.

Rispetto al primo test set che comprende solo Salerno, questi nuovi insiemi di test comprendono differenti luoghi ed anni. In particolare si considerano nuovi dati dalle quattro stazioni impiegate nell'addestramento (Sessa Aurunca, Policastro Bussentino, Montemarano, Greci). Mentre in precedenza, i dati impiegati erano del 2013 e del 2014, questi nuovi test set considerano dati di Gennaio, Marzo e Giugno 2015.

La rete neurale proposta, calcola in suo output come:

$$y_k = f \left\{ \left[\sum_{j=1}^Z w_j g \left(\left(\sum_{i=1}^7 p_{ji} x_{ik} \right) + b_j \right) \right] + a \right\} \text{ with } |K| = \text{No. pattern (III.52)}$$

dove f e g sono rispettivamente gli strati di output e nascosto adottati, p_{ji} è la matrice dei pesi dei neuroni nascosti j e neuroni di input i , w_j è il vettore dei pesi di cui al neuroni nascosto j ed il neurone di output, z è il numero di neuroni nascosti, x_{ik} è la matrice di input, b_i è il vettore di bias dei neuroni nascosti, a è il valore bias del neurone di output, y_k è il valore dell'uscita per il giorno k -esimo. La rete scelta dopo il processo di ricombinazione ed i risultati ottenuti nella fase di test sono riportati nel Capitolo 6.

3.7.2. Implementazione del modello ANN per la previsione della radiazione diretta oraria

La previsione della radiazione diretta (DNI) rappresenta un aspetto fondamentale per una completa valutazione del potenziale solare. Infatti, mentre le misure della radiazione globale sono spesso ottenute sfruttando i dati di una qualsiasi stazione radiometrica, la disponibilità di dati relativi alle DNI è più limitata. Inoltre, anche quando esistono misure della radiazione diretta, i dati restano ridotti e non comprendono grandi serie storiche.

Solitamente, quindi, si fa ricorso a modelli matematici al fine di stabilire l'ammontare della risorsa diretta per specifiche applicazioni solari.

L'analisi della DNI viene spesso condotta partendo dai dati di radianza globale.

A partire dai valori registrati di tale grandezza, la stima della radiazione diretta viene effettuata utilizzando modelli di decomposizione che si basano sulla regressione tra due indici principali: l'indice di chiarezza k_t (radianza globale su superficie orizzontale/ radianza orizzontale extraterrestre) e la trasmittanza diretta k_b (radianza diretta normale/ iradianza extraterrestre (Lopez et al., 2005). Tuttavia, la stima della DNI è influenzata dalla crescente complessità legata alla presenza di relazioni non lineari tra le principali variabili da cui dipende (Gueymard et al., 2011). Pertanto i tradizionali metodi statistici non sono efficienti.

Le reti neurali artificiali possono sfruttare un mix di dati sperimentali e valori calcolati per la previsione della DNI. Il modello presentato ha come obiettivo quello di valutare la radiazione diretta oraria investigando differenti soluzioni alternative, come fatto per la radiazione globale giornaliera.

Al fine di risolvere la problematica legata alla carenza di dati sperimentali, una stazione di misura è stata installata all'Università di Salerno. I dati sono stati ottenuti con intervallo di campionamento pari ad un'ora. Le misure si riferiscono principalmente all'radianza diretta, ottenuta tramite un pireliometro, ed ai dati di radianza globale sul piano normale e di temperatura dell'aria, già in parte sfruttati per la stima della radiazione globale. Per il modello della rete neurale sono stati considerati dati per sei mesi nella fase di addestramento, mentre il sottoinsieme di validazione

Capitolo 3

prevede dati per due mesi. Come per il modello della GR, anche nel caso della DNI l'analisi parte con la definizione dell'insieme di variabili di input.

In Tabella III.13 viene riportata l'analisi di correlazione per quattro variabili astronomiche e radiometriche: l'indice di chiarezza (k_t), l'angolo di declinazione (δ), l'angolo orario (HRA) e l'radianza globale normale (G_{ni}).

Tabella III.13 *Analisi di correlazione per gli input del modello DNI*

Variabili	Correlazione (R)
Angolo orario (HRA)	-0.505
Radianza globale normale (G_{ni})	0.985
Indice di chiarezza (K_t)	0.929
Angolo di declinazione (δ)	-0.657

Si può osservare come quest'ultima variabile risulta fortemente incidente sulla stima della DNI, infatti, il suo valore di correlazione è molto vicino all'unità.

Dopo aver scelto il tipo di variabili, è stato condotto, anche in questo caso, uno studio circa il numero di parametri di input. In Tabella III.14, differenti combinazioni delle variabili di input sono state investigate insieme ai rispettivi valori di nRMSE e la migliore soluzione è risultata quella che include tutte le variabili analizzate:

$$DNI = f(k_t, \delta, HRA, G_{ni}) \quad (III.53)$$

L'angolo di declinazione e l'angolo orario permettono l'addestramento della rete neurale riportando informazioni circa il giorno considerato ed il numero di ore di luce. In particolare l'HRA influenza la lunghezza del percorso della radiazione attraverso l'atmosfera; pertanto esso può sostituire l'air mass.

Tabella III.14 *Numero di input e nRMSE per il modello DNI*

	# Input	Input	nRMSE
1	3	G_{gi} . HRA. K_t	0.0458
2	3	G_{gi} . HRA. δ	0.0328
3	3	G_{gi} . K_t . δ	0.0191
4	4	G_{gi} . HRA. K_t . δ	0.00967

L'indice di chiarezza rappresenta il fattore più rilevante nella predizione della DNI. Esso è definito come il rapporto tra l'radianza globale orizzontale e l'radianza extraterrestre. Pertanto, rappresenta una misura indiretta dell'azione di filtraggio compiuta dall'atmosfera. L'ultima variabile considerata è l'radianza globale normale che fornisce informazioni circa gli effetti climatici e meteorologici durante il processo di valutazione.

Come nel caso del modello per la GR, l'algoritmo di LM è stato adottato per l'addestramento della rete, poiché garantisce le migliori performance (Sfetsos and Coonick, 2000).

Tabella III.15 *Differenti configurazioni topologiche per la rete neurale DNI*

Topologia della rete	Funzioni di trasferimento	# di strati nascosti	# di neuroni nascosti
DNT 1	tanh - tanh	1	4
DNT 2	tanh - tanh	1	5
DNT 3	tanh - tanh	1	6
DNT 4	sigmoid - linear	1	4
DNT 5	sigmoid - linear	1	5
DNT 6	sigmoid - linear	1	6
DNT 7	tanh - tanh - linear	2	4 - 2
DNT 8	tanh - tanh - linear	2	3 - 2
DNT 9	tanh - tanh - linear	2	5 - 3

Anche in questo caso, nove configurazioni topologiche della rete sono state considerate, simulando su uno stesso insieme di validazione (DNT1-DNT9) come riportato in Tabella III.15. La migliore configurazione è stata, poi, testata su un ulteriore sottoinsieme di test di circa un mese. L'output del modello di rete neurale, proposto per il calcolo della radiazione diretta oraria è calcolato come:

$$y_k = f\left\{\left[\sum_{j=1}^z w_j g\left(\left(\sum_{i=1}^4 p_{ji} x_{ik}\right) + b_j\right)\right] + a\right\} \text{ with } |k| = \text{No. pattern} \quad \text{(III.54)}$$

Come per il modello relativo alla GR, anche i risultati legati alla configurazione scelta ed ai test effettuati sono riportati nel Capitolo 6.

Capitolo 4: Modellazione teorica dei sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione

4.1. Introduzione

La fase di modellazione teorica costituisce uno dei punti cardine del presente lavoro. Seppur nel capitolo precedente si sia già iniziata la fase modellistica, esponendo i modelli alle reti neurali per la previsione della radiazione globale e diretta, essa riguardava il problema dell'input, che per quanto centrale nella fase di dimensionamento e producibilità dell'impianto, non è legata alla definizione della componentistica di un sistema CPV/T ed al suo funzionamento.

L'analisi teorica, tuttavia, non può essere del tutto scorporata da quelli che sono stati gli studi sperimentali sui sistemi. Infatti, come vedremo, molto della fase modellistica richiama all'analisi sperimentale, sia per quanto riguarda i dati di input per i modelli, sia per quanto concerne la definizione di un modello integrato. In ogni caso, in questo capitolo, verranno esposti i principali modelli sviluppati per lo studio dei sistemi a concentrazione e per l'analisi delle problematiche esposte nei capitoli precedenti. Nel capitolo successivo, invece, si farà riferimento all'analisi sperimentale, mostrando sia gli impianti allestiti che le campagne di misurazione condotte.

La modellazione dei sistemi a concentrazione, nello specifico, di sistemi atti alla produzione combinata di energia, quindi sistemi termo – fotovoltaici che permettano l'ottenimento sia di energia termica che elettrica, risulta molto articolata in quanto deve analizzare molteplici aspetti. In primo luogo, per poter modellare un sistema, vanno definiti alcuni componenti chiave che permettano di poter dare corpo all'impianto. In questo senso, siccome l'analisi è volta a studiare differenti soluzioni, verranno esposti differenti tipologie di impianti che si differenziano per i componenti scelti e le configurazioni adottate. Infatti, l'analisi di un solo schema di impianto non condurrebbe ad uno studio a 360 ° del sistema da implementare in ottica di

un'utenza domestica. Quindi, ragionando nei termini di un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione, verranno definiti i principali schemi adottati. Uno volta presente lo schema di riferimento, la modellazione, in prima analisi, si concentra sulla definizione della producibilità sia elettrica che termica. In questo senso, è chiaro che la parte elettrica non può prescindere da un modello per la cella a tripla giunzione. Tale modello, prima definito teoricamente, sarà valutato sperimentalmente e nel Capitolo 6, si effettuerà anche un confronto tra le prestazioni teoriche e quelle sperimentali, al fine di monitorare la sua bontà. Collegato alla parte elettrica e che fa da ponte con la parte termica si trova la definizione della temperatura della cella. Tale aspetto, come già evidenziato, è basilare per le prestazioni elettriche ed è il motore per la parte termica dell'impianto.

La fase di modellazione delle prestazioni termiche, anche in questo caso, non può prescindere dalla definizione del sistema e soprattutto del modello di impianto per il raffreddamento attivo delle celle. Pertanto, prima di definire i modelli teorici, è importante studiare la parte di circuito per lo scambio termico. Una volta messi a punto gli strumenti per la valutazione della producibilità sia elettrica che termica del sistema termo – fotovoltaico a concentrazione, si potrà analizzare nel Capitolo 6 un esempio di dimensionamento di impianto riferito ad un'utenza residenziale. In questo caso, visto l'obiettivo di analizzare i sistemi a concentrazione, si presenterà un possibile schema di collegamento dell'impianto. In questo senso, quindi, è necessario definire preliminarmente anche un modello per l'analisi dei fabbisogni di un'utenza specifica. Ciò consente, nel Capitolo 6, di valutare dal punto di vista dell'energy management, la gestione dell'impianto, una volta definita la sua producibilità. In ultima analisi, si analizzeranno alcuni modelli per l'analisi di problematiche specifiche, come la necessità di manutenzione oppure l'impatto ambientale.

4.2. Concept preliminare per la modellazione di un sistema CPV/T

Lo studio dei modelli per analizzare le prestazioni di un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione è stato suddiviso in differenti parti, ciascuna delle quali necessita, in parte, di un'analisi sperimentale per l'ottenimento dei risultati, mostrati nel Capitolo 6. In questo senso, ritornando alle problematiche espresse nel Capitolo 2, possiamo distinguere sostanzialmente quattro linee di analisi:

1. Analisi dell'input;
2. Modello del sistema a concentrazione;
3. Modello elettrico;
4. Modello termico;

Capitolo 4

Tale suddivisione permette di articolare la presentazione dei modelli in maniera univoca, ed è volta sostanzialmente a definire quel “**modello integrato**”, citato nel Capitolo 2 che, a fronte delle richieste di una specifica utenza, permetta:

- di dimensionare l'impianto CPV/T, una volta definite le principali caratteristiche;
- di analizzare la producibilità elettrica e termica;
- gestire correttamente i vettori energetici prodotti in funzione delle richieste dell'utenza.

L'esempio di tale modello integrato sarà presentato nel Capitolo 6, come riferimento ad un caso specifico. In questo senso, avendo già definito il modello per la previsione della radiazione globale e diretta, quindi l'input, in questo Capitolo si affronteranno le problematiche, principalmente legate al funzionamento dell'impianto.

Pertanto, in primo luogo va definito la componentistica e la configurazione del sistema CPV/T. Nel modello dell'impianto, va considerato anche il sistema di recupero del calore che incide sulla producibilità termica. In primo luogo, verranno analizzate le scelte legate all'ottica ed alla configurazione, in secondo luogo, poi, prima di esaminare i modelli per l'output termico, si analizzerà un possibile circuito per il raffreddamento. Nel merito della scelta della configurazione e delle ottiche, incide chiaramente la valutazione del fattore di concentrazione. Come vedremo, per poter mantenere vive più opzioni, si definiranno due principali schemi, rendendo i modelli funzione del fattore C, in modo da poter, una volta esposta l'analisi sperimentale, calcolare l'output sulla base di valori certi.

Il modello elettrico, non può prescindere dal modello della cella, mentre il modello termico, oltre che della definizione del circuito richiede la valutazione della temperatura della cella, fondamentale, come detto, anche per la prima analisi di producibilità elettrica.

Infine, la valutazione dei fabbisogni e l'impostazione di un modello integrato di collegamento con l'utenza, permette di analizzare le prestazioni e la gestione energetica complessiva di un possibile impianto CPV/T.

In Figura IV.1 è possibile schematizzare tutte le fasi di modellazione affrontate nel lavoro. Mentre la fase di modellazione dell'input è stata analizzata del Capitolo precedente, in questo Capitolo l'attenzione si sposta su:

- definizione di ottiche e configurazioni per lo studio dei sistemi a concentrazione;
- modello teorico della cella in concentrazione;
- modello per la valutazione della temperatura della cella;
- modello per la valutazione della producibilità elettrica;

- definizione del circuito di raffreddamento;
- modelli termici
- applicazioni aggiuntive.

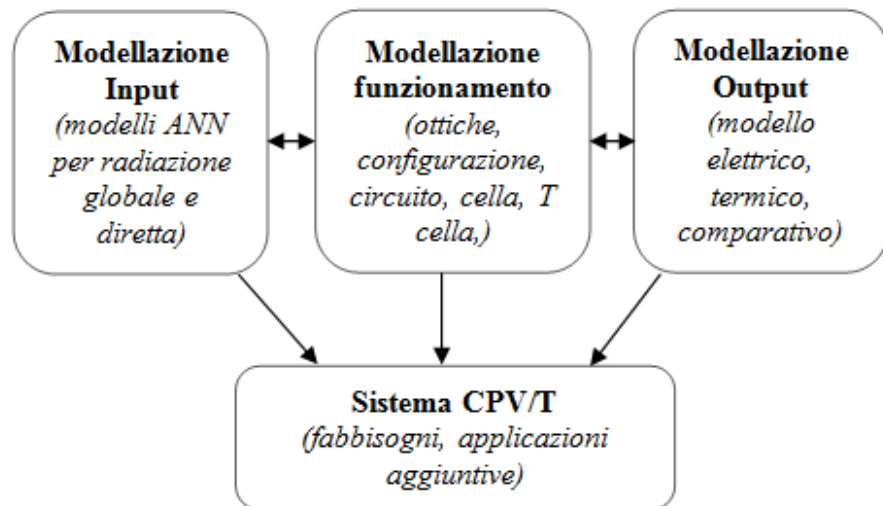


Figura IV.1 Fasi di modellazione

Infine del Capitolo 6, si presenterà il funzionamento integrato del sistema CPV/T collegato ad un'utenza, mostrando anche un esempio di dimensionamento.

4.3. Definizione delle configurazioni adottate

La prima fase per poter modellare le prestazioni di un sistema a concentrazione è la definizione della componentistica necessaria. Nella fattispecie, le scelte principali sono legate a:

- ottica;
- configurazione;
- concentrazione;
- sistema di raffreddamento;
- sistema di inseguimento.

Le ottiche e la configurazione incidono, come visto nel Capitolo 2, sulla concentrazione e sulla producibilità dell'impianto. Infatti a seconda del tipo di ottica, la concentrazione varia e si modifica anche l'efficienza con la quale la luce concentrata viene trasmessa sul ricevitore. La configurazione, inoltre,

incide, oltre che sulla producibilità elettrica, anche su quella termica in quanto modifica lo scambio di calore tra celle e fluido di raffreddamento.

In questo senso, come vedremo, la scelta di ottica e concentrazione non è definitiva, ma si basa su differenti modelli.

La concentrazione, parametro principe di un impianto CPV/T, viene lasciata come “**variabile libera**”. In questo senso, dopo aver definito nei modelli elettrici e termici la sua influenza sulla producibilità, si analizzerà sperimentalmente il fattore ottenuto. In questo senso, si caratterizzeranno le prestazioni al variare della concentrazione. Infatti, se da un lato, lavorare con alti fattori permette di ottenere teoricamente una producibilità, almeno elettrica maggiore, questo non è altrettanto vero per la parte termica. Infatti aumentando il fattore di concentrazione, aumentano le dimensioni delle ottiche e l’ingombro e quindi, ogni caso va analizzato nello specifico, a partire dalle varie configurazioni scelte. Per quanto concerne il sistema di raffreddamento, si sceglierà un sistema attivo da integrare nel ricevitore.

Infine, come chiaramente evidenziato, un sistema a concentrazione per poter lavorare costantemente con la radiazione diretta, necessita di un sistema di inseguimento biassiale.

4.3.1. Il set di ottiche e configurazioni

La necessità di modellare un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione, analizzando tutte le possibili alternative ci ha portati a definire differenti soluzioni sia per le ottiche che per le configurazioni.

Come evidente, tali alternative sono interconnesse tra loro ed implicano differenti ripercussioni sui modelli sia elettrici che termici.

Per quanto riguarda le ottiche, sia dal punto di vista di definizione dei sistemi a concentrazione, sia dal punto di vista dei modelli teorici che, infine, dal punto di vista sperimentale, si sono considerate ottiche:

- rifrattive (lenti di Fresnel);
- riflesse (specchi).

L’ottica primaria, incide sulla configurazione per quanto riguarda le dimensioni, sulla concentrazione e sulla producibilità. Dal punto di vista modellistico, il parametro principale che influisce sul sistema è il rendimento ottico. Tale variabile, come visto nel Capitolo 1, tramite l’equazione (I.8), può essere definita come il rapporto tra il fattore di concentrazione ottico e quello geometrico. Ciò presuppone, oltre alla conoscenza delle dimensioni, anche una fase di analisi sperimentale. In questo senso, per poter preliminarmente tener conto dell’efficienza dell’ottica scelta nei modelli, si può definire per le lenti, un’efficienza teorica pari a:

$$\eta_{\text{ottico, lenti}} = 0,85^{n \text{ ottiche}} \times \tau \quad (\text{IV.1})$$

Dove il numero di ottiche, lavorando con lenti di Fresnel, è generalmente pari a 2, in quanto si necessita di un'ottica secondaria, come un caleidoscopio, per poter evitare l'aberrazione cromatica. Il parametro τ , invece, rappresenta la trasmittanza del vetro ed è solitamente pari a 0,94.

Scegliendo un'ottica riflessiva, ad esempio con specchi parabolici, il rendimento ottico può essere calcolato come:

$$\eta_{\text{ottico, specchi}} = \tau \left[\rho + \frac{1}{C} \times \left(1 - \frac{\rho \cdot A_{\text{concentratore}}}{A_c} \right) \right] \quad (\text{IV.2})$$

Dove ρ è la riflessività degli specchi. I due valori τ e ρ dipendono dal grado di finitura superficiale del vetro e dello specchio. Si può notare che in questa formulazione, è richiesta la definizione di un valore preliminare di C . In questo caso si intende un fattore geometrico, calcolabile come rapporto tra le aree di concentratore primario e cella.

L'ottica scelta ha influenza sulla configurazione. Nei modelli si terrà conto sia di una configurazione point – focus che di una line – focus. È evidente che scegliendo un'ottica rifrattiva, composta da lenti di Fresnel, si presuppone uno schema point – focus. Invece, per quanto riguarda l'ottica riflessiva si può valutare sia una configurazione point – focus che una line, come riportato in Figura IV.2 e IV.3.

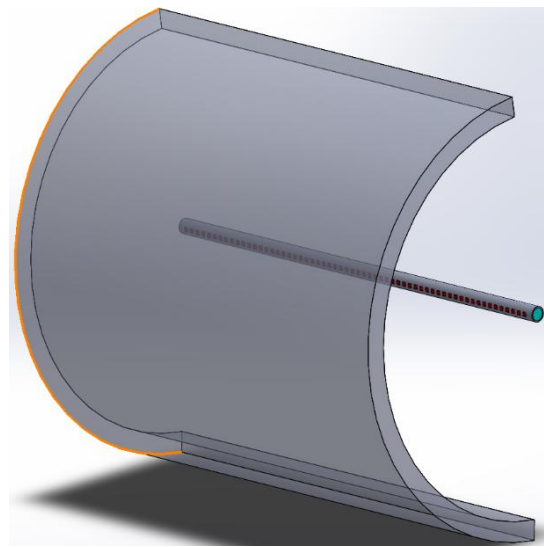


Figura IV.2 Configurazione line – focus per un'ottica riflessiva

Le Figure, realizzate in CATIA, mostrano già il possibile sistema di scambio termico sotto le celle. È importante osservare che per ciascuna configurazione, cambiando l'ottica, cambiano le dimensioni del sistema e quindi il fattore di configurazione ed il numero di celle installabili.

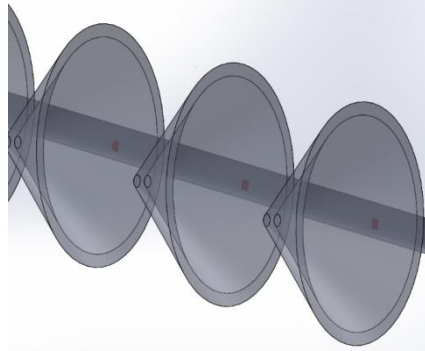


Figura IV.3 Configurazione point – focus per un'ottica riflessiva

Nel lavoro parlando di ottiche e configurazioni, porteremo avanti sia teoricamente che sperimentalmente entrambe le soluzioni.

4.3.2. Scelte nel modello del sistema a concentrazione

In Tabella IV.1 sono riportate le principali scelte del modello.

Tabella IV.1 Scelte del modello per un CPVT

Parametro	Scelta	Analisi
<i>Ottica</i>	-rifrattiva (lenti) -riflessiva (specchi)	teorico - sperimentale
<i>Configurazione</i>	-point focus -line focus	teorico - sperimentale
<i>Concentrazione</i>	medio alta	teorico - sperimentale
<i>Sistema raffreddamento</i>	attivo	teorica
<i>Sistema inseguimento</i>	biassiale	teorica

In particolare si può osservare, la flessibilità che si vuole conferire alla modellazione ed all'analisi, mantenendo un ampio range di possibilità.

4.4. Il modello teorico della cella in concentrazione

Il funzionamento della cella in concentrazione incide sulle prestazioni sia elettriche che termiche del sistema CPV/T. Nel Capitolo 2 è stato descritto, in maniera generale, il comportamento di una cella fotovoltaica analizzando i principali parametri e focalizzando l'attenzione sulle celle a tripla giunzione. In questa sezione, mostriamo un primo modello teorico per descrivere il funzionamento della cella che poi inciderà sul modello elettrico complessivo dell'impianto.

In generale, i parametri che caratterizzano la cella sono la tensione di circuito aperto (V_{oc}), la corrente di corto circuito (I_{sc}), il rendimento (η_c), il fill factor (FF) e le resistenze serie (R_s) e di shunt (R_{sh}). La valutazione dell'andamento di tali parametri in funzione della concentrazione, viene definito sperimentalmente nel Capitolo 5.

In questa fase, osserviamo come a seconda della radiazione, la cella teoricamente dovrebbe rispondere in termini di potenza elettrica ottenuta.

Abbiamo visto in Figura II.7, infatti, che a seconda della concentrazione e della temperatura della cella, il punto di massima potenza si sposta. Questa rappresenta la principale motivazione per un'analisi sperimentale delle caratteristiche della cella a tripla giunzione.

In via preliminare, possiamo dire che, conoscendo tramite i modelli alle reti neurali la radiazione diretta incidente (G_{dir}) è possibile scrivere la potenza incidente sulla cella come (Renno et al., 2016):

$$G_{inc,c} = G_{dir} \cdot C \cdot A_c \cdot \eta_{opt} \quad (IV.3)$$

Dove la concentrazione C , l'area della cella A_c ed il rendimento ottico (η_{opt}), dipendono dalle scelte fatte in fase di definizione del sistema.

Teoricamente, stabilita la potenza incidente sulla cella, la potenza elettrica erogata è solo funzione del rendimento (Chemisana et al., 2011):

$$P_{el,th,c} = G_{inc,c} \cdot \eta_{c,th} \quad (IV.4)$$

Dove il rendimento teorico della cella ($\eta_{c,th}$), dipende, come detto, dalla concentrazione e dalla temperatura e può essere calcolato come:

$$\eta_{c,th} - \eta_{ref} = \sigma_t \cdot (T_c - T_{ref}) \quad (IV.5)$$

Dove T_{ref} è la temperatura di riferimento pari a 25°C e η_{ref} è il rendimento della cella di riferimento, corrispondente al valore di targa di concentrazione, come riportato dal costruttore della cella (Emcore, 2012).

Il coefficiente di temperatura, σ_t , indica la riduzione percentuale di efficienza in funzione dell'aumento di temperatura. Il suo valore può essere impostato a -0.04%/°C in un range tra 10°C/100°C. In Tabella IV.2, è riportato un esempio di caratteristiche della cella, fornite da un costruttore (Emcore, 2012).

Tabella IV.2 Esempio di caratteristiche fornite dal costruttore

Parametro	Valore
materiale	InGaP/InGaAs/Ge
dimensioni	5.5 mm x 5.5 mm
η_r (a 25 °C, 50 W/cm ²)	39.0%
Coefficiente di temperatura (σ_t)	-0.04%/°C

Si può osservare come sul rendimento della cella incidano le caratteristiche riportate dal costruttore. Per questo sarà fondamentale definire sperimentalmente tutti i parametri della cella in funzione della concentrazione. Teoricamente, tuttavia, è possibile valutare il coefficiente di temperatura come (Steiner et al., 2011):

$$\sigma_t = \frac{d\eta}{dT} = -0,09167 + 0,005787 \cdot \ln(C) \quad (IV.6)$$

Dove si può osservare la dipendenza di tale fattore dal logaritmo della concentrazione.

L'equazione IV. 6 linearizza una serie di misure sperimentali. Ciò rende ancora più evidente la necessità di tale caratterizzazione.

Teoricamente, in base alla concentrazione, è possibile definire anche la tensione di circuito aperto come (Cotal et al., 2009):

$$V_{0c}(C) = 2,5847 + 0,085283 \cdot \ln(C) \quad (IV.7)$$

Dove, ancora una volta, sono fondamentali delle misure sperimentali per ottenere l'andamento di riferimento.

In conclusione si può osservare che il parametro fondamentale per stabilire la potenza elettrica erogata dalla cella è il rendimento. La sua misura, è fortemente legata alla temperatura della cella stessa, che pertanto diviene un ulteriore elemento da modellare. Si può, inoltre, evidenziare come tutti i parametri della cella siano funzione della concentrazione e , quindi, è necessaria un'analisi sperimentale al variare di tale fattore.

Il modello teorico, presentato in questa sezione, permette la valutazione del rendimento della cella e della sua potenza, una volta stabilita la concentrazione e valutata la temperatura.

Dopo le analisi riportate nel seguito, sarà possibile calcolare il rendimento sia teorico che sperimentale, osservando le principali differenze, in termini di risultati ottenuti, nel Capitolo 6. È importante tener sempre presente che tutte le stime partono da una buona valutazione dell'input, pertanto i modelli del Capitolo 3 risultano, ancora una volta, fondamentali per l'intera analisi.

4.5. Modellazione della temperatura della cella

La definizione della temperatura della cella a tripla giunzione ha effetti su:

- caratterizzazione della cella;
- potenza elettrica erogabile;
- producibilità termica del sistema CPV/T.

Come descritto nel Capitolo 2, analizzando le problematiche legate alla temperatura della cella, si è osservato che la caratteristica $I - V$ si modifica al variare della temperatura poiché variano sia tensione di circuito aperto che corrente di corto circuito.

Ciò incide sul rendimento che, come visto nell'equazione IV.5 è dipendente direttamente dalla temperatura operativa della cella. Pertanto, la stima di tale valore influenza la potenza elettrica erogabile ed allo stesso tempo, rappresenta un'opportunità per la cogenerazione. Infatti, raffreddando le celle con un circuito di raffreddamento attivo è possibile produrre energia termica. Quindi la valutazione della temperatura rappresenta una delle principali analisi nella definizione del comportamento di un sistema CPV/T.

La temperatura della cella oltre che dalla concentrazione, dipende dalle proprietà intrinseche del materiale e pertanto la sua modellazione risulta molto complessa. Tale problematica è stata analizzata attraverso:

- modellazione teorica della temperatura;
- analisi sperimentale;
- modellazione teorico – sperimentale (metodo Random Forest).

In primo luogo, si è valutato solo teoricamente l'andamento della temperatura. Tuttavia, tale analisi, come vedremo, risulta molto limitata in quanto trascura molte variabili. Pertanto, solo un'analisi sperimentale, riportata nel Capitolo 5, ha permesso un'effettiva valutazione della temperatura della cella. In questo senso, però, per avere delle stime per ogni condizione, si è generalizzata l'analisi sperimentale, impiegando alcuni modelli che, a partire proprio dalle rilevazioni sul campo, permettano la valutazione di tale parametro in ogni situazione, come il modello Random Forest.

Nelle sezioni successive, quindi, verranno mostrati i due metodi modellistici impiegati, uno solo teorico ed uno teorico – sperimentale. Prima di affrontare tale fase, possiamo analizzare alcuni modelli presenti in letteratura che cercano di risolvere la problematica appena esposta.

4.5.1. Letteratura sulla modellazione della temperatura della cella

Il problema della valutazione della temperatura di una cella a tripla giunzione costituisce una tematica di interesse in ambito internazionale. Tale parametro influenza una serie di variabili; infatti, l'efficienza, il punto di massima potenza, la tensione di corto circuito, il fill factor diminuiscono con l'aumento della temperatura.

Al contrario, la temperatura influenza positivamente la corrente di corto circuito (Pérez-Higueras et al., 2011). La semplice misura della temperatura risulta complessa, pertanto, in letteratura sono stati analizzati differenti metodi:

- IEC 60904-5, che determina la temperatura della cella attraverso il valore di tensione di corto circuito (Fernandez et al., 2014);
- metodo della resistenza termica, che sfrutta la temperatura dello scambiatore all'interfaccia con la cella (Rubio et al., 2008);
- modello lineare: che calcola l'output richiesto tramite dei parametri atmosferici (Almonacid et al., 2012);
- rete neurali, che mettono in relazione la temperatura della cella con parametri atmosferici in maniera non lineare.

I primi due metodi sono basati su misure dirette effettuate sul sistema mentre gli ultimi due sono basati su misure atmosferiche e quindi sono applicabili più facilmente (Fernandez et al., 2014).

4.5.1.1 Metodo IEC 60905-5

L'International Electrotechnical Commission ha sviluppato un modello per il calcolo della temperatura della cella a partire dalla tensione a circuito aperto. L'equazione generale del modello è la seguente (Pérez-Higueras et al., 2011):

$$T_c = T_c^* + \beta^{-1} \left(V_{oc} - V_{oc}^* + \frac{nk(T_c + 273)}{q} N_s \ln \frac{DNI^*}{DNI} \right) \quad (IV.8)$$

Dove T_c^* è la temperatura della cella nelle condizioni di riferimento, β è il coefficiente sperimentale che lega l'aumento della tensione a circuito aperto con l'incremento della temperatura, pari a $-25.16 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, V_{oc}^* è la tensione a circuito aperto nelle condizioni di riferimento (valore fornito dal costruttore), n è il fattore di idealità del diodo, k è la costante di Stefan – Boltzmann, q è la carica dell'elettrone, N_s è il numero di celle disposte in serie nel modulo mentre DNI^* è la radianza normale diretta di riferimento.

Le condizioni di riferimento sono definite da: $DNI^*=1000 \text{ W/m}^2$, e $T_c^*=25^\circ\text{C}$. Con questo approccio, il valore di n , necessario per la stima della temperatura, si ottiene tramite una regressione lineare sulle misure si tensione a circuito aperto (Kinsey et al., 2008).

4.5.1.2. Metodo basato sulla resistenza termica

L' Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentracion (ISFOC) ha sviluppato un metodo per il calcolo della temperature della cella sfruttando la resistenza termica interna tra la cella solare e la superficie su cui essa poggia (Rubio et al., 2008). In questo modo, temperatura della cella viene calcolata tramite la temperatura dello scambiatore con cui la cella è a contatto. L'applicazione del metodo prevede la conoscenza della resistenza termica interna:

$$\rho = \frac{(T_c - T_{h-s})}{DNI} \quad (\text{IV.9})$$

Dove T_{h-s} è la temperatura dello scambiatore e con DNI si intende la radianza normale diretta. Il valore della resistenza termica può essere valutato teoricamente conoscendo gli spessori degli strati L_i e le conducibilità termiche k_i .

$$R = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{L_i}{k_i} \right) \quad (\text{IV.10})$$

La relazione tra R e ρ è di tipo proporzionale in quanto ρ tiene conto della DNI che incide sul modulo. Pertanto è necessario applicare un coefficiente che tenga conto della concentrazione. Pertanto:

$$\rho = C_{\text{corr}} R \quad (\text{IV.11})$$

A partire dal valore della resistenza, si calcola in modo indiretto, quindi, la temperatura della cella.

4.5.1.3 Modello ai coefficienti lineari

In contrasto con i metodi visti è possibile considerare il calcolo della temperatura della cella attraverso dei coefficienti lineari che dipendono da grandezze atmosferiche e non da caratteristiche misurate del sistema. Il metodo si basa su una semplice equazione lineare (Almonacid et al., 2012):

$$T_c = T_a + \alpha DNI + \beta W_s \quad (\text{IV.12})$$

Dove W_s è la velocità del vento. I parametri α e β sono ottenuti empiricamente e attraverso una regressione applicata ad un sistema sperimentale e sono pari a $\alpha = 0.0611 \text{ }^\circ\text{C/Wm}^{-2}$ e $\beta = -2.33 \text{ }^\circ\text{C/ms}^{-1}$.

Capitolo 4

4.5.1.4. Reti neurali

L'efficacia delle reti neurali nel modellare fenomeni non lineari è stata abbondantemente provata nel Capitolo precedente. Il problema della valutazione della temperatura della cella rientra sicuramente in questa casistica, pertanto, il metodo proposto indaga la previsione di tale temperatura sfruttando, ancora una volta dei parametri atmosferici.

Come nel modello lineare del paragrafo precedente, la rete neurale lavora in funzione di: DNI, temperatura ambiente (T_{air}) e la velocità del vento (WS). Quindi la temperatura della cella è stimata tramite una relazione del tipo (Fernandez et al., 2014):

$$T_c = f(DNI, T_{air}, WS) \quad (IV.13)$$

Per stimare questa funzione si impiega una rete feed – forward che sfrutta l'algoritmo di Levenberg – Marquardt per la fase di training. Il numero dei neuroni dello strato di input ed output dipendono dal numero degli input e degli output, mentre il numero di neuroni nascosti, fissato a cinque, è stato determinato empiricamente attraverso la costruzione di diverse reti.

Per addestrare la rete neurale e quindi per quantificare il valore dei pesi e dei bias, utilizzati nel calcolo dell'output della rete, è stato necessario sfruttare un sistema sperimentale, che consente di fornire un dataset da cui la rete neurale possa apprendere le dipendenze funzionali della temperatura della cella dalle grandezze atmosferiche. Al fine di evitare l'overfitting si sono utilizzati tre subset, quali training (70%), validation (15%) e test set (15%) ed è stata impiegata la tecnica dell'early stopping. Grazie all'algoritmo di LM è stato possibile, a partire dai dati raccolti, ricavare i valori dei pesi e dei bias con lo scopo di minimizzare l'errore quadratico medio.

Per studiare il comportamento della rete neurale e valutarne le caratteristiche di accuratezza è stata effettuata un'analisi dell'errore sui data set di training, validation e test (Almonacid et al., 2015).

In particolare, si è ottenuto un scarto quadratico medio (RMSE) minore del 5% per ogni dataset, con un errore medio dei bias (MBE) compreso nella fascia tra il +0.3% e il -0.3%, ed un R^2 superiore a 0.94. Ciò permette di asserire che la rete né sottostima né sovrastima la temperatura della cella ed esprime un adeguato adattamento della previsione ai valori reali.

4.5.1.5. Analisi comparativa dei metodi proposti

I quattro metodi analizzati, sono stati comparati al fine di individuare il metodo più preciso (Fernandez et al., 2014). Un primo confronto è stato effettuato tramite un'analisi di regressione lineare, analizzando il valore di godness of fit (R^2). Nello specifico, i risultati migliori sono stati ottenuti dal

modello ISFOC, basato sulla resistenza termica, con un valore pari a 0.99. Al secondo posto troviamo il metodo sviluppato da IEC che utilizza la tensione a circuito aperto, il cui R^2 è pari a 0.98. Infine troviamo il modello alle reti neurali e il modello di regressione lineare.

Una seconda analisi ha riguardato il confronto sull'errore medio. Ancora una volta, il metodo basato sulla resistenza termica è risultato il migliore con un RMSE del 2.95%. Come in precedenza, il peggior modello è quello basato sulla regressione lineare dei parametri atmosferici.

In generale, l'analisi dell'errore permette di dire che i modelli stimano con buona accuratezza la temperatura della cella. In Figura IV.4, è possibile osservare l'andamento dell'errore in funzione del campo di temperature della cella.

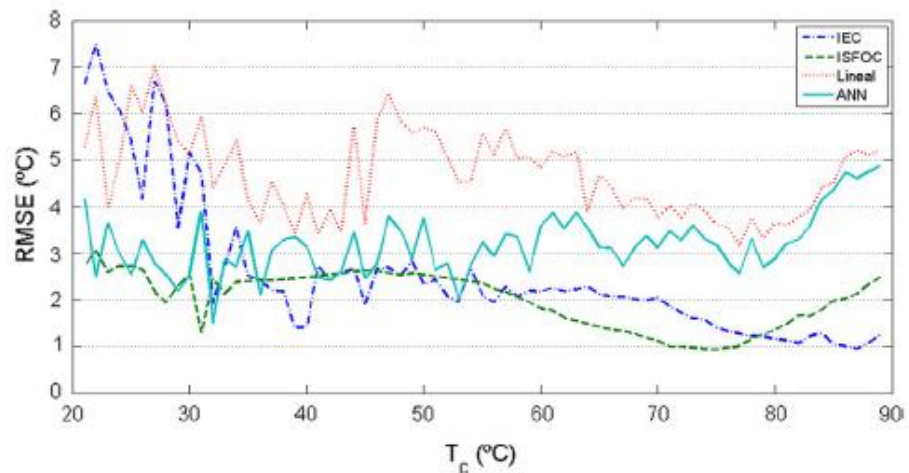


Figura IV.4 Andamento dell'RMSE in funzione della temperatura

Si può osservare come le previsioni siano buone in un campo di temperature poco variabile, mentre per valori al di sotto di 40°C e superiori a 75°C, l'errore aumenta. Ciò è dovuto principalmente alla scelta delle variabili per modellare il problema.

4.5.2. Modello teorico per la temperatura della cella

La difficoltà nella valutazione della temperatura della cella quando si lavora in concentrazione è legata essenzialmente alla definizione delle corrette variabili da impiegare ed ai legami che intercorrono tra di esse. Si può notare che, nei metodi presenti in letteratura, pochi considerino la variabile concentrazione nelle loro valutazioni. In particolare, solo il metodo ISFOC la impiega come fattore correttivo e, come osservato è il metodo che pur prevedendo una misura indiretta, stima meglio la temperatura della cella.

Capitolo 4

Pertanto, nel primo modello elaborato, di tipo analitico, si cerca di tener conto della concentrazione nella definizione della temperatura. In fase preliminare quindi, essa può essere valutata come (Luque et al., 1998):

$$T_c = T_0 + \frac{V_{oc}(T_c, C) - V_{oc}(T_0, C_0)}{\beta(C)} \quad (IV.14)$$

Dove T_0 è la temperatura ambiente esterna, $V_{oc}(T_c, C)$ è la tensione di circuito aperto in funzione della temperatura della cella e del fattore di concentrazione, $V_{oc}(T_0, C_0)$ è la tensione di circuito aperto in base a temperatura esterna e fattore pari ad 1, mentre $\beta(C)$ è il coefficiente termico di tensione. Tale espressione, esprime la temperatura della cella in maniera intrinseca, poiché la tensione di circuito aperto viene a dipendere dalla stessa T_c . Sfruttando delle misure sperimentali (Cotal et al., 2009), è possibile linearizzare la tensione di circuito aperto, rendendola solo funzione della concentrazione, come visto nell'equazione IV.7, in modo che V_{oc} risulti indipendente dalla temperatura di funzionamento.

Pertanto, resta da definire il coefficiente termico di tensione che viene anch'esso a dipendere univocamente da C e calcolato come (Steiner et al., 2011):

$$\beta(C) = -0,006424 + 0,00036233 \cdot \ln(C) \quad (IV.15)$$

In base alle ipotesi precedenti, la temperatura della cella può essere analiticamente calcolata come:

$$T_c = T_0 + \frac{V_{oc}(C) - V_{oc}(C_0)}{|\beta(C)|} \quad (IV.16)$$

Nota la temperatura della cella si può procedere con il calcolo del rendimento della cella, il quale dipende da T_c e dalla concentrazione come espresso nell'equazione IV.5.

Il modello appena analizzato, seppur tiene conto di differenti variabili che entrano in gioco nel problema della valutazione della cella, risulta abbastanza approssimativo in quanto:

- tende a linearizzare le dipendenze funzionali tra le variabili, quindi risulta applicabile solo in un determinato range di concentrazione e temperatura;
- può portare a sovrastimare la temperatura in quanto si basa su determinate valutazioni sperimentali che non tengono conto di tutte le condizioni;
- per semplicità analitica, esclude taluni parametri quali la corrente foto – generata e la radiazione che possono giocare un ruolo importante ma che sono difficili da esprimere.

Per queste motivazioni, il modello presentato può andare bene in condizioni standard, ma modificando sia la concentrazione che le condizioni di funzionamento, si potrebbero perdere alcuni legami funzionali importanti. Ciò può condurre ad errate stime di producibilità elettrica, in quanto si sottostima il rendimento della cella ed al contempo ad valori sbagliati di producibilità termica, poiché si tiene conto di una temperatura maggiore.

Per evitare tali errori, si è quindi resa necessaria:

- un'analisi sperimentale che provvedesse alla valutazione della temperatura della cella, una volta allestito l'impianto a concentrazione;
- un modello più raffinato, di tipo teorico – sperimentale, che tenesse in considerazione differenti dipendenze.

Mentre l'analisi sperimentale verrà presentata nel Capitolo 5, nella sezione successiva analizzeremo il metodo teorico – sperimentale impiegato, che si basa sul modello Random Forest.

4.5.3. Principi per la modellazione teorico – sperimentale della temperatura della cella

In questa sezione analizzeremo la definizione di un modello per la temperatura della cella che sfrutta dati ricavati sperimentalmente per generalizzare il comportamento del fenomeno. In particolare, l'obiettivo è quello di ottenere una valutazione che tenga conto di tutte le variabili in gioco e consideri tutte le possibili condizioni di funzionamento. Da quanto detto, si può osservare come ci avviciniamo nuovamente ad algoritmi di intelligenza artificiale come le reti neurali. In questo caso, il campo esplorato per la definizione del modello teorico – sperimentale della cella, è quello del “**machine learning**”. Esso rappresenta una delle aree fondamentali nel campo dell'intelligenza artificiale e si occupa della realizzazione di algoritmi che, basandosi sulla raccolta di dati, rappresentino di nuovi contenuti informativi. L'apprendimento può avvenire catturando caratteristiche di interesse provenienti da esempi, strutture dati o sensori, per analizzarle e valutarne le relazioni tra le variabili osservate (Mitchell, 1997).

Uno degli obiettivi principali di ricerca sull'apprendimento automatico è quello di imparare a riconoscere automaticamente modelli complessi e prendere decisioni intelligenti basate su dati. La principale difficoltà consiste nel fatto che l'insieme di tutti i possibili comportamenti, dati tutti gli input possibili, è troppo grande per essere coperto da insiemi di esempi osservati (dati di allenamento). Da qui è necessario l'utilizzo di tecniche per

Capitolo 4

generalizzare gli esempi citati, in modo da essere in grado di produrre un comportamento utile per casi nuovi.

L'apprendimento automatico è di per sé un campo multidisciplinare. Esso si basa sui risultati di intelligenza artificiale, probabilità e statistica, teoria della complessità computazionale, teoria del controllo, dell'informazione ed altri campi.

In questo senso, il problema della temperatura della cella, verrà investigato, in maniera innovativa, attraverso la tecnica del "data mining".

4.5.3.1. Il data mining

Il data mining è una disciplina ibrida che integra differenti tecniche, quali basi di dati, statistica, elaborazione del segnale ed altre. Essa deriva dalla necessità di nuove tecniche per analizzare, capire o addirittura visualizzare le enormi quantità di dati memorizzati raccolte da parte delle imprese o per applicazioni scientifiche. Le principali aree funzionali del data mining sono: associazione, classificazione, previsione e clustering (Zhou, 3003).

Il data mining è una tecnica potente per l'estrazione predittiva di informazioni provenienti da database di grandi dimensioni. L'approccio usato nel data mining prevede proprio lo sfruttamento di database, nei quali si effettuano ricerche di modelli nascosti al fine di rivelare informazioni predittive che sono troppo complicate da identificare per gli esperti (Fernandez et al., 2002). Le fasi del processo di data mining sono:

- Comprensione del fenomeno e degli obiettivi;
- Comprensione dei dati: la qualità dei dati è determinante e le prime intuizioni sul modello avvengono in questa fase;
- Preparazione dei dati: selezione, pulizia, costruzione dei set e formattazione;
- Modellazione: esistono diverse tecniche per lo stesso problema di data mining, a volte le tecniche hanno esigenze specifiche riguardanti la forma di dati, come accade per le reti neurali che richiedono valori normalizzati.

Successivi passi sono la selezione della tecnica di modellazione, la generazione di test, la creazione e la valutazione dei modelli (Kucuksille et al., 2011).

La parte di modellazione può essere affrontata ricorrendo a differenti approcci e tecniche:

1. **Albero di decisione:** è un metodo di apprendimento per approssimazione di una funzione obiettivo, inizialmente discreta in cui l'elemento che si costruisce, nella fase di apprendimento, è rappresentato proprio dall'albero di decisione. Gli alberi di decisione possono essere rappresentati da un insieme di regole if – else.
2. **Rete neurale artificiale:** impiegate per simulare relazioni complesse tra ingressi e uscite che altre funzioni analitiche non riescono a rappresentare.
3. **Programmazione genetica:** approccio all'apprendimento ispirato all'evoluzione simulata. La ricerca di una soluzione del problema inizia con una popolazione di soluzioni iniziale. I membri della popolazione attuale danno luogo a una popolazione di nuova generazione per mezzo di operazioni quali la mutazione casuale e l'accoppiamento, che sono modellati sui processi di evoluzione biologica. Ad ogni passo, le soluzioni della popolazione attuale sono valutate rispetto a una determinata misura, e le migliori, sono selezionate come semi per la produzione della prossima generazione.
4. **Support Vector Machine:** sono un insieme di metodi di apprendimento supervisionato usati per la classificazione e la regressione di pattern. Dato un insieme di esempi di addestramento, ciascuno contrassegnato come appartenente a due possibili categorie, un algoritmo di addestramento costruisce un modello in grado di prevedere a quale categoria deve appartenere un nuovo esempio di input.

4.5.3.2. *Classification and Regression Tree (CART)*

Un albero di decisione, o un albero per la classificazione o la regressione (CART), è un modello statistico usato per risolvere i problemi di classificazione e di regressione. Esso descrive le diverse classi o valori che un output può assumere. In generale, un albero è costituito da un insieme di nodi e collegamenti organizzati secondo una gerarchia senza alcun ciclo.

Un albero di decisione è un albero dove ogni nodo di split memorizza una funzione di test da applicare ai dati in arrivo. I nodi finali sono chiamati foglie dell'albero. Ogni foglia memorizza il risultato finale o risposta. L'albero in genere è binario e cioè ogni nodo interno ha esattamente due archi uscenti. Ovviamente, il problema della previsione prevede l'uso di un albero di regressione. Un esempio di albero di regressione è presente in Figura IV.5 (Lahouar e Slama, 2015).

Nell'esempio in Figura IV.5, l'albero di regressione è costruito considerando il carico elettrico come funzione della massima temperatura, del tipo di giorno e della stagione. In questo modo in funzione dei valori delle variabili indipendenti si definisce un valore previsionale della variabile dipendente, scorrendo l'albero attraverso la successione di condizioni che si pongono, fino ad arrivare ad una foglia. L'albero decisionale è robusto, immune agli ingressi irrilevanti e facilmente interpretabile.

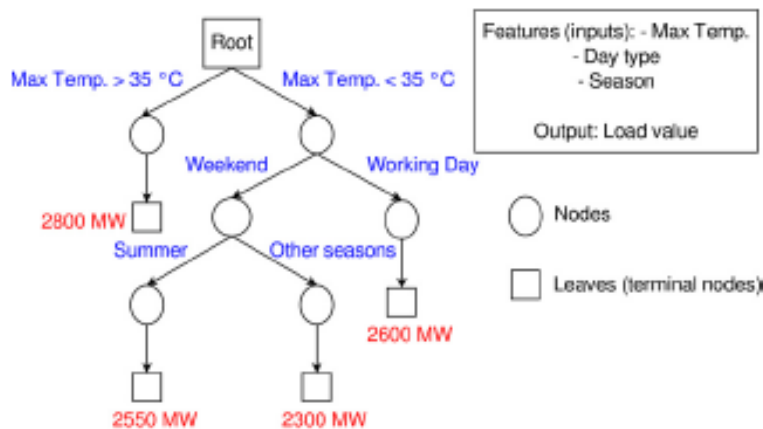


Figura IV.5 Esempio di albero di regressione per prevedere il carico elettrico

Chiamiamo X il vettore di input contenente p valori, Y il valore di uscita e S_n il campione di addestramento composto da n osservazioni (X_i, Y_i) , allora il problema è descritto come:

$$S_n = \{(X_i, Y_i), \dots, (X_n, Y_n)\}, X \in \mathbb{R}^p, Y \in \mathbb{R} \quad (IV.17)$$

L'albero affronterà una fase di formazione e una di test. Durante la formazione, un algoritmo farà in modo che gli ingressi definiscano degli split sui nodi, in modo che i parametri delle funzioni di split ottimizzino l'adattamento all'insieme di training S_n . Il principio è quello di dividere lo spazio d'ingresso X in maniera ricorsivo per la ricerca di sottopartizioni ottimali. La costruzione dell'albero può sfruttare diversi algoritmi come CART, la cui idea è di suddividere ciascun nodo dell'albero in modo che i nodi generati dallo split siano più "puri" del nodo originale. Negli alberi di regressione un nodo "a" è più puro del nodo b se la varianza di Y è più bassa in "a" che in "b". Pertanto, in CART si andrà a suddividere lo spazio degli ingressi in maniera che nelle sottopartizioni la varianza sia minore rispetto a quella di partenza. Pertanto, l'impurità del nodo t è data da:

$$\text{Var}(t) = R(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} (y_i - \hat{y}_t)^2}{n_t} \quad (IV.18)$$

Dove y_i sono tutti i valori della variabile dipendente appartenenti a S_n che ricadono nel nodo t , n_t è il numero di elementi in t mentre \hat{y}_t è lo stimatore del valore dell'output nel nodo t , che è pari alla media delle y_i .

Il decremento di impurità $\Delta R(t)$ che deriva dallo split del nodo t in t_l e t_r è:

$$\Delta R(t) = R(t) - R(t_l) - R(t_r) \quad (\text{IV.19})$$

Quindi lo split migliore è quello che massimizza $\Delta R(t)$.

L'errore di previsione si basa su osservazioni che non siano state utilizzate per la costruzione dell'albero. I dati a disposizione vengono dunque suddivisi in un set di addestramento ed uno di test. L'espansione dell'albero viene fermata da un criterio di terminazione. Esso comunemente è individuato nel raggiungimento di un numero massimo di livelli o quando un nodo contiene meno di un certo numero definito di osservazioni. Alla fine della formazione dell'albero, si ottiene una funzione per la stima, costruita su S_n :

$$\hat{Y} = \hat{h}(X, S_n) \quad (\text{IV.20})$$

Si ottiene così l'output \hat{Y} ottenuto su un insieme di valori di input X a cui corrisponde un valore vero Y .

4.5.3.3. Ensemble models – Random Forest

Gli ensemble models hanno come scopo la definizione di un modello predittivo integrando differenti modelli. Un approccio tipico è il bagging, che sta per aggregating bootstrap (Breiman, 2001). L'idea principale è quella di costruire predittori indipendenti tramite un set di addestramento in modo che l'output sarà costituito dalla media degli output di ciascun predittore. Il bagging applicato ad insiemi di alberi di decisione, nonché alberi di regressione, funziona molto bene in confronto ai singoli alberi. Una variante del bagging è il modello Random Forest che impiega un gran numero di singoli alberi decisionali (Brown et al., 2005).

Ogni albero di decisione è costruito con un sottoinsieme campionario del training set, ma utilizza solo N delle funzioni disponibili dei modelli.

Random Forest (RF) è un metodo ensemble che unisce la previsione di molti alberi di decisione. Il principio fondamentale per la costruzione degli alberi di decisione prevede che un campione di dimensione n , estratto dall'insieme S_n , sia selezionato in modo casuale e usato per il training. Questo campione è scelto con reinserimento, cioè la stessa coppia di osservazioni $(X_i; Y_i)$ può comparire più volte.

Indicando con θ_i le variabili indipendenti che rappresentano la selezione random del campione, attraverso un modello RF, si selezionano differenti

Capitolo 4

campioni $(S_n^{\theta_1}, \dots, S_n^{\theta_q})$ e si applica l'algoritmo CART per costruire ciascun albero e creare gli split necessari, minimizzando l'impurezza dei nodi. Si ottengono, così, q alberi di regressione che forniranno l'output attraverso la media dei loro output in presenza di un pattern per il test.

Formalmente, l'output sarà dato da:

$$\hat{Y}' = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \hat{h}(X', S_n^{\theta_i}) \quad (\text{IV.21})$$

Il vantaggio principale di quest'approccio è l'immunità al rumore, dal momento che genera alberi non correlati attraverso la diversa modalità di formazione imposta. Un solo albero può essere sensibile a rumore, mentre la media di molti alberi non correlati non lo è. La selezione di un sottoinsieme casuale di caratteristiche in ogni gruppo ha proprio lo scopo di rendere non correlati i modelli ad albero tra loro.

Un'altra caratteristica fondamentale che caratterizza il modello Random Forest è l'errore chiamato out – of – bag error (OOBE). L'OOBE è una sorta di cross validation interna; esso è la media degli errori commessi sull'output Y_i da ciascun albero che non ha utilizzato il pattern di Y_i nella fase di training. Tale errore risulta molto utile in quanto è indice della capacità di generalizzazione del modello costruito.

$$\text{OOBE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (\text{IV.22})$$

Il modello Random Forest viene impiegato per la modellazione teorico – sperimentale della temperatura della cella.

4.5.4. Modello teorico – sperimentale Random Forest e modelli di

confronto

La problematica della temperatura della cella in un sistema a concentrazione, viste la sua complessità dovuta ai legami fortemente non lineari tra le variabili, viene risolta con un modello di apprendimento che sfrutta il data mining. Nello specifico, si arriva alla definizione di un modello Random Forest che sfrutta l'algoritmo CART.

Il processo prevede la comprensione del fenomeno di cui si vogliono stimare le caratteristiche, la raccolta e comprensione dei dati ed infine la fase di elaborazione e modellazione. In particolare, il modello viene realizzato attraverso il software di data mining KNIME.

Tale software permette la costruzione di più modelli, nello specifico, il modello Random Forest è stato confrontato con un modello di regressione lineare ed una rete neurale.

Quindi, al fine di ottenere la previsione della temperatura della cella durante il funzionamento del sistema a concentrazione, si è elaborato un

modello di Random Forest e le sue prestazioni, come vedremo nel Capitolo 6, sono state confrontate con altri modelli. Le principali fasi per la modellazione teorico – sperimentale sono:

1. Acquisizione dei dati sperimentali;
2. Costruzione e preparazione dei data set;
3. Scelta delle variabili di input;
4. Implementazione dei modelli.

Al fine di poter raccogliere dati a sufficienza per costruire un modello di previsione della temperatura della cella solare si è condotta una diffusa campagna di prove sperimentale. Nel Capitolo 5, analizzeremo nello specifico le misure effettuate, utili per tutte le fasi della modellazione. Le misure impiegate per questo modello, tuttavia, prevedono valori raccolti per oltre un anno.

4.5.4.1. Costruzione e preparazione dei data set

La fase di analisi sperimentale, come detto, ha permesso di ottenere i dati relativi a differenti grandezze al fine di fornire i necessari data set per la costruzione del modello di previsione.

Le grandezze monitorate sono:

1. temperatura sotto la superficie della cella;
2. temperatura della superficie superiore della cella;
3. temperatura ambiente;
4. tensione ai capi della cella;
5. resistenza elettrica;
6. corrente foto – generata;
7. radianza globale e diretta;
8. concentrazione.

Grazie ai sensori installati ed agli impianti allestiti è stato possibile osservare tutte queste grandezze in un intervallo temporale abbastanza lungo. Nello specifico, le prove sperimentali hanno coperto buona parte del periodo più caldo e quindi di maggiore interesse scientifico. Il campionamento delle grandezze è stato effettuato ogni 15 secondi.

Una volta raccolti i data set, essi sono stati lavorati in maniera da eliminare istanze frutto di transitorio o condizionate da una perdita di concentrazione sulla cella. Pertanto, si è provveduto all'eliminazione degli outliers dal data set. Per identificare gli outliers si sono utilizzate due grandezze:

Capitolo 4

- la temperatura sopra cella;
- la corrente foto – generata.

Gli outliers dovuti ad un transitorio sono evidenziati dal fatto che la temperatura della cella, all’inizio e alla fine della prova, è molto distante dalla temperatura media che la cella ha avuto per la durata sperimentale. In questo modo se la temperatura della cella, all’istante t , è inferiore di 3 volte la deviazione standard dalla temperatura media della cella stessa, l’insieme di valori ottenuti in quell’istante costituisce un outlier. La corrente foto – generata invece, decresce fortemente quando si opera in condizione di scarsa concentrazione. In questo modo se la corrente foto – generata si discosta notevolmente dalla corrente media ottenuta durante la prova, vuol dire che si è identificata un'altra tipologia di outlier. In Tabella IV.3 è riportato un esempio di valori soglia per il riconoscimento degli outliers per alcuni mesi, tali valori sono stati impiegati per la pulizia dei data set.

Tabella IV.3 Esempio di valori soglia per il riconoscimento degli outliers

Mese	Temperatura sopra cella [°C]			Corrente [A]		
	Media	Deviazione	Limite Inferiore	Media	Deviazione	Limite Inferiore
Aprile	46,7	4,6	32,8	0,42	0,10	0,32
Maggio	50,2	7,3	31,9	0,51	0,19	0,41
Giugno	42,8	7,1	25,1	0,21	0,29	0,44
Luglio	52,8	8,3	32,2	0,51	0,19	0,32

La seconda parte di pretrattamento dei dati è stata eseguita utilizzando KNIME Analytics Platform. KNIME è uno strumento di analisi dati e di data mining che, in maniera intuitiva, consente di costruire dei flussi costituiti da blocchetti predisposti i quali vanno collegati tra loro, per definire la direzione del flusso di dati (input, output).

La parte di pretrattamento dei dati implementata in KNIME consente di estrarre l’ora, considerandolo come un intero, all’interno del time – step, e di ottenere dei valori medi delle grandezze caratteristici del minuto (e non ogni 15 secondi). L’estrazione del valore di ora è ritenuta fondamentale perché si pensa di utilizzare questa grandezza come input al modello Random Forest in quanto, in funzione dell’ora del giorno, si può avere una temperatura della cella maggiore o minore derivante dalla dipendenza dei fenomeni climatici dall’orario. La fase di pretrattamento è implementata nella parte di flusso KNIME, riportata in Figura IV.6.

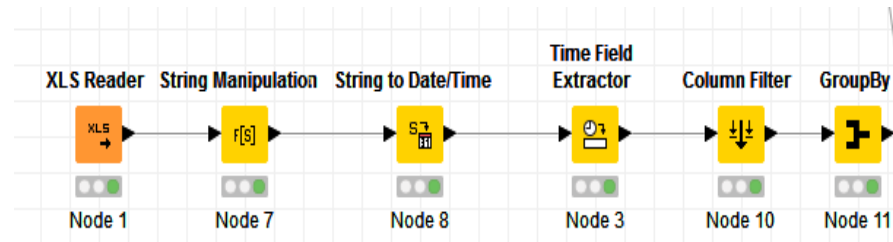


Figura IV.6 Schema logico del pretrattamento dei dati in KNIME

Il primo blocchetto è necessario a leggere il data set “pulito” nel path indicato. Successivamente, grazie al blocco “**String Manipulation**”, si estrae l’ora dalla colonna che contiene l’orario completo del campionamento. Per estrarre l’orario si è scelta la funzione “substr” che consente di estrarre una sottostringa da una stringa madre. In questo caso si sceglie la colonna che contiene l’orario completo estraendo i primi 8 caratteri. Il risultato finale andrà a finire in una colonna aggiuntiva chiamata “time”.

Il data set è completo e pulito per orario, per poter estrarre le stringhe di interesse si adoperano i blocchi successivi, “**String to Date/Time**” e “**Time Field Extractor**”. Il primo consente di trasformare il campo “time” da stringa in tempo. In questo modo è possibile adoperare il secondo blocco che agisce su questa specifica tipologia di dato estraendo, in maniera automatica, l’ora, il minuto e il secondo del campionamento. Queste tre informazioni vengono riportate in tre colonne separate e considerate come integer.

Il successivo blocco “**Column Filter**” consente di filtrare le colonne inutili per il proseguo. L’ultimo blocco “**Groupby**” ha il compito di svolgere le medie dei valori all’interno del minuto.

La funzione principale di questo blocchetto è quella di aggregare le righe che hanno i valori dei campi selezionati uguali e, per ciascuna riga, svolgere delle operazioni, quali somma e media ad esempio, sulle grandezze prescelte.

Tali operazioni consentono di avere un data set trattato con i valori mediati, ad esempio per minuto. Il risultato di questa fase di pretrattamento dei dati è osservabile in Tabella IV.4, dove sono riportati, per esempio, i valori mediati nel minuto, di temperatura su cella ed irraggiamento per un giorno specifico (3 Giugno 2015 – da 10:20 a 10:25).

Infine si è segmentato lo spazio degli input in due insiemi: l’insieme dei dati di training e quello di test.

L’implementazione della segmentazione è avvenuta tramite un blocco chiamato “**Partitioning**” che consente di definire la grandezza relativa (in percentuale) dell’insieme di training e la modalità di campionamento dell’insieme. In questo caso si è scelta una segmentazione 80/20 e che cioè vede l’insieme di training pari all’80% dell’insieme di partenza.

Tabella IV.4 Esempio di dati pretrattati

Giorno	Mese	Anno	Ora	Minuto	T media [°C]	G medio [W/m ²]
3	6	2015	10	20	45.1	833.7
3	6	2015	10	21	46.6	832.9
3	6	2015	10	22	48.4	833.8
3	6	2015	10	23	49.3	833.3
3	6	2015	10	24	49.8	832.1
3	6	2015	10	25	50.1	834.5

4.5.4.2. Scelta degli input

Al fine di prevedere la temperatura della cella (output) si è proceduto con la scelta delle variabili di input da utilizzare. I principali parametri caratterizzanti il problema sono: la temperatura ambiente, la radianza, la velocità del vento e la corrente foto – generata, la concentrazione.

L’approccio impiegato, prevede l’analisi di diversi set di variabili di input. Il primo set è costituito da:

- temperatura ambiente;
- radianza;
- fattore di concentrazione;
- ora del giorno;
- corrente foto – generata.

La temperatura ambiente è ovviamente un parametro fondamentale per definire lo scambio di calore che vi è tra l’aria e la cella fotovoltaica stessa. Allo stesso modo la radiazione sulla cella incide fortemente sulla temperatura di quest’ultima e, pertanto, si tiene conto di questo effetto considerando il valore di radianza globale e quello del fattore di concentrazione.

La corrente costituisce un contributo grazie all’effetto joule che ha luogo all’interno della cella mentre l’ora del giorno incide in quanto le condizioni climatiche sono condizionate da questo parametro.

La velocità che caratterizza lo scambio convettivo tra cella e aria, non è stata considerata, in assenza di prove sperimentali adeguate.

Addestrando il modello con gli input così definiti, come vedremo nel Capitolo 6, si è osservato che la corrente non influiva sull'output mentre, ad esempio, escludendo l'ora del giorno, l'errore aumentava dell'8%. Pertanto il set definitivo di input prevede:

- ora del giorno;
- fattore di concentrazione;
- temperatura ambiente;
- radianza globale.

Va osservato come, la bontà del modello, sta proprio nel considerare la concentrazione come variabile di input. In questo senso, grande incidenza sul modello teorico, hanno le prove sperimentali in quanto hanno consentito di modellare tale aspetto.

4.5.4.3. Implementazione del modello Random Forest

La modellazione della temperatura della cella tramite un modello Random Forest è di tipo non lineare continuo. In Figura IV.7 si può osservare i blocchi implementati in KNIME.

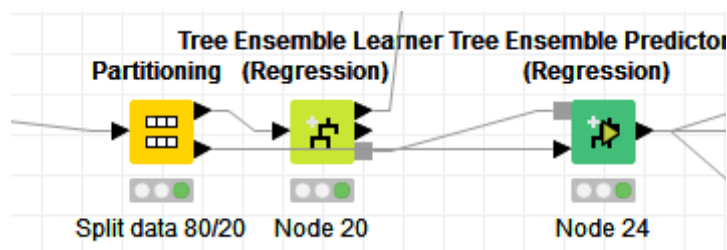


Figura IV.7 Implementazione del modello Random Forest

Il blocco principale che implementa la fase di apprendimento del modello è il “**Tree Ensemble Learner (Regression)**” mentre il blocco che, avuto in input il test set e il modello, effettua le previsioni è il “**Tree Ensemble Predictor (Regression)**”. Nella configurazione del primo blocco citato si indicano gli input utilizzati dal modello ed alcune specifiche relative alla configurazione del modello ad albero. In questo caso bisognerà specificare il numero di alberi (modelli) di cui si vuole comporre la foresta e la percentuale del data set di training da utilizzare per il training di ciascun albero della foresta.

Il modello Random Forest può essere rappresentato graficamente tramite una serie di alberi di decisione che frammentano lo spazio degli input, grazie alla fase di apprendimento, per arrivare ad un unico valore di output per tutti

i possibili valori di input. Ad esempio un albero può avere anche 30 livelli diversi, in funzione del diverso apprendimento che hanno subito. Lo spazio degli input si segmenta man mano che si scende di livello.

Al livello 0, ad esempio, si testa se la variabile concentrazione è minore o uguale di 100 o meno. In questo modo si può segmentare lo spazio in due sottospazi. Al primo split si ha che nel primo sottospazio si hanno 1500 casi mentre nel secondo se ne hanno 1800, ad esempio. Considerando il ramo dove la concentrazione è minore o uguale a 100 la seconda variabile che viene testata è l'irraggiamento, ad esempio. In questo caso si effettua un'altra segmentazione fino ad arrivare all'ultimo livello definito dal processo di addestramento, come spiegato nella parte teorica relativa al modello Random Forest. L'output finale sarà frutto della media degli output di ciascun albero. Questi output sono frutto del processo di discesa dei livelli dell'albero effettuato in funzione dei valori di input. Nel Capitolo 6, saranno mostrati i risultati di simulazione teorico – sperimentale ottenuti.

4.5.4.4. Implementazione di modelli di confronto (regressione e reti neurali)

La bontà del modello Random Forest realizzato può essere valutata confrontando soluzioni modellistiche alternative. Nello specifico, modelli di regressione lineare e reti neurali. In Figura IV.8 è viene mostrata l'implementazione in KNIME del modello di regressione lineare.

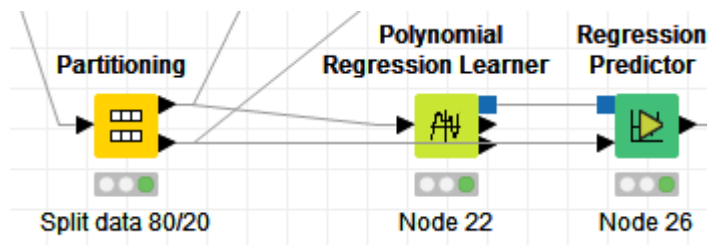


Figura IV.8 Costruzione del modello di regressione lineare

Dal blocco di partitioning si invia il data set di training al blocco che implementa il modello, cioè il “**Polynomial Regression Learner**” che definisce i coefficienti del modello di regressione, a partire dai dati di input. Il data set di test è inviato al “**Regression Predictor**” che effettua le previsioni sui dati non usati per il training, avendo in ingresso le informazioni relative al modello di regressione lineare. Il modello implementato è di grado 5. La valutazione dell'output avviene tramite la misura dell'MSE:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum (y_m - y_p)^2 \quad (IV.23)$$

Dove y_m è il valore misurato della temperatura della cella mentre y_p rappresenta il valore previsto.

Le reti neurali rappresentano un approccio non lineare alternativo al problema della temperatura della cella. La rete implementata è una resilient back – propagation feed – forward neural network.

Questa tipologia di rete neurale sfrutta un'euristica per l'apprendimento supervisionato. L'algoritmo tiene conto solo del segno della derivata parziale durante l'applicazione della back – propagation.

In Figura IV.9 viene mostrata l'implementazione della rete neurale, sempre in KNIME.

Prima di poter addestrare la rete è necessario normalizzare i valori in un certo intervallo, in questo caso [0, 1]. In questo modo il processo di apprendimento non è influenzato dai differenti ordini di grandezza delle misure. Il processo di normalizzazione è garantito dal blocco "normalizer".

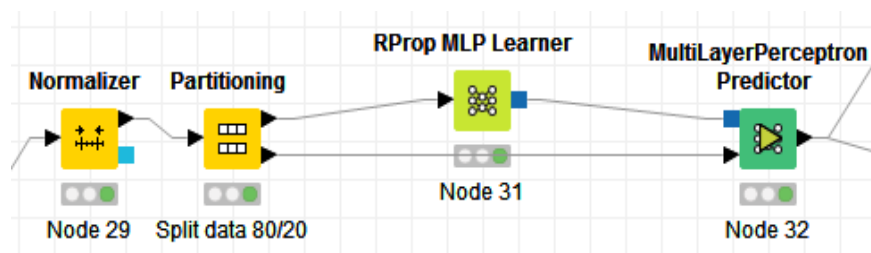


Figura IV.9 Implementazione della rete neurale

Dopo aver partizionato il data set, ancora una volta, nel training set e nel test set si inviano i dati di addestramento al nodo che consente la creazione della rete neurale, il "RProp MLP Learner".

Prima di giungere ad una configurazione univoca della rete neurale è stato necessario effettuare una fase di validazione della topologia variando il numero di neuroni nello strato nascosto, considerando un solo strato nascosto che, in genere, rappresenta il miglior compromesso tra velocità e accuratezza.

I risultati ottenuti ed il confronto con il modello Random Forest saranno mostrati nel Capitolo 6.

4.6. Modello elettrico del sistema a concentrazione

La producibilità elettrica del sistema CPV/T costituisce il primo output effettivo degli impianti modellati. In questa fase, l'obiettivo è quello di definire un modello che al variare delle condizioni, permetta di valutare univocamente la producibilità elettrica del sistema.

In questo senso, sull'output elettrico dell'impianto incidono:

Capitolo 4

- potenziale solare;
- caratteristiche e prestazioni elettriche della cella;
- fattore di concentrazione;
- ottica;
- configurazione;
- disposizioni impiantistiche.

Risulta evidente, per quanto detto nei capitoli precedenti, che la definizione della zona di interesse per l'installazione dell'impianto è fondamentale al fine di conoscere il potenziale solare in termini di radiazione globale e diretta incidente. Tale definizione costituisce l'input al modello elettrico. Nei paragrafi precedenti, inoltre, abbiamo osservato le prestazioni della cella in concentrazione. Essa costituisce il blocco elementare del sistema e condiziona la producibilità in funzione del suo rendimento. La concentrazione, che incide sulla cella, chiaramente è fondamentale per l'output. Come detto, essa è una variabile di modellazione, di cui il modello deve tener conto, ma che non può essere fissata univocamente, ma deve poter variare in modo da caratterizzare differenti impianti. Allo stesso modo, le ottiche e la configurazione incidono sulla producibilità elettrica. Le prime in funzione del rendimento ottico, variano la potenza incidente e permettono a seconda delle scelte, differenti livelli di concentrazione. La configurazione, incide sicuramente sul fattore di concentrazione. Infatti, come vedremo nell'analisi sperimentale, sistemi line – focus, presentano fattori inferiori, ma consentono migliori prestazioni termiche. Inoltre, la configurazione incide anche sul numero di celle installabili per modulo a concentrazione. Ciò prelude all'ultimo aspetto indicato, ovvero le disposizioni impiantistiche. Infatti a seconda delle richieste da soddisfare, il sistema CPV/T avrà un numero di celle che possono disporsi in differenti moduli. Pertanto, si introducono nuove variabili come:

- numero di celle;
- numero di moduli.

Il modello elettrico, anche in questo caso, deve poter lasciare queste variabili libere in modo da poter caratterizzare i sistemi a concentrazione in differenti situazioni. In Figura IV.10, è possibile osservare il flow – chart del modello elettrico realizzato.

Definita la radiazione diretta sulla cella G_{dir} , possiamo esprimere la potenza elettrica teorica della cella, dalle equazioni IV.3 e IV.4 (Renno e Petito, 2016):

$$P_{el,th,c} = G_{dir} \cdot C \cdot A_c \cdot \eta_{opt} \cdot \eta_{c.th} \quad (IV.24)$$

Tale espressione ci permette di caratterizzare già le scelte in merito all'ottica ed alla concentrazione. Infatti, il rendimento ottico varia se si parla

di lenti o specchi, e C può essere modificato a seconda dei valori impostati, ottenibili anche sperimentalmente.

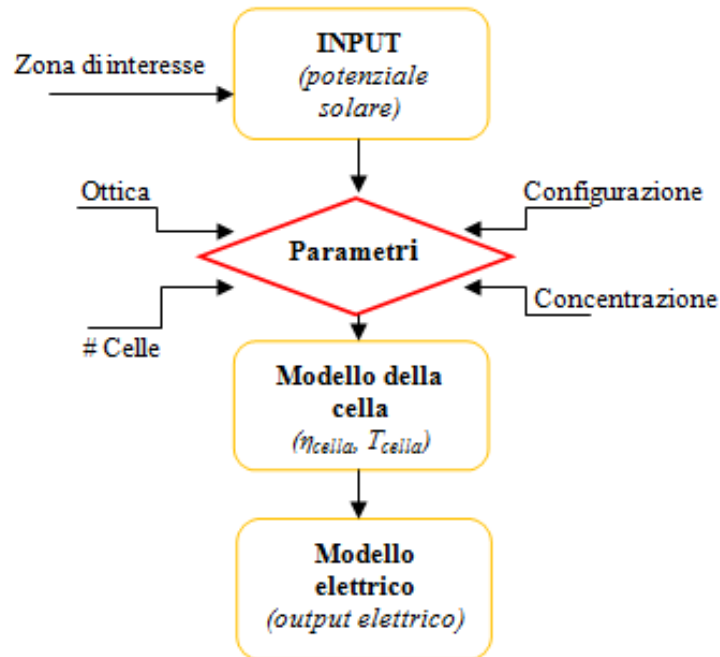


Figura IV.10 Flow – chart del modello elettrico

Si può osservare che anche l’area della cella dipende dalle scelte fatte; nella fase di analisi sperimentale, infatti, verrà definita l’area attiva della cella. Parliamo di rendimento teorico della cella in quanto, al momento, la sua definizione resta legata a valori analitici, quindi non ottenuti sul campo. In generale, va considerato che la formulazione IV.24, può essere adottata ragionando con il sistema reale, quindi con un valore di rendimento sperimentale.

Nella definizione della producibilità elettrica, a questo punto, vanno considerate le scelte in base a numero di celle e moduli. Possiamo definire la potenza elettrica di un modulo come (Renno e Petito, 2016):

$$P_{el,th,module} = P_{el,th,c} \cdot N_c \cdot \eta_{module} \quad (IV.25)$$

Dove N_c rappresenta il numero di celle che costituiscono il modulo e η_{module} è la sua efficienza. Nello specifico, variando la configurazione oppure a seconda delle esigenze dell’utenza, il numero di celle per modulo può variare. Il rendimento tiene conto della connessione delle celle in serie, eventuali correnti parassite e perdite per ombreggiamenti parziali di alcune celle. Il suo valore, fino a 100 celle per modulo può essere fissato a 0.95

Capitolo 4

(Kribus et al., 2006). A questo punto, definito un certo numero di moduli, in base si ha che la potenza elettrica del sistema CPV/T è:

$$P_{el,th,CPV/T} = P_{e,module} \cdot N_m \cdot \eta_{inverter} \quad (IV.26)$$

Tale formulazione considera il numero di moduli che costituiscono il sistema CPV/T ed il rendimento dell'inverter (Renno e Petito, 2015).

Parliamo sempre di potenze elettriche teoriche, con l'analisi sperimentale, avendo misure certe dei rendimenti, possiamo validare tale formule e parlare di potenze effettive. In questo senso, una formulazione univoca della potenza elettrica del sistema CPV/T, dove sono presenti tutte le variabili modellabili a seconda del tipo di sistema è:

$$P_{el,CPV/T} = (G_{dir} \cdot C \cdot A_c \cdot \eta_{opt} \cdot \eta_c) \cdot N_c \cdot \eta_{modulo} \cdot N_m \cdot \eta_{inverter} \quad (IV.27)$$

In questo caso, esprimiamo tutto in termini potenze e rendimenti reali. Tale formulazione offre un modellazione della parte elettrica che dipende da tutte le scelte che si possono fare nella definizione del sistema. Tutte le variabili sono lasciate libere; in questo modo, si può far riferimento a tale schema in ogni condizione. Nel Capitolo 6, vedremo i risultati di producibilità elettrica, integrando nel tempo l'equazione IV.27, a seconda del tipo di impianto.

4.7. Principi base per la modellazione termica di un sistema

CPV/T

La fase di modellazione termica presuppone la definizione di uno schema per il raffreddamento attivo delle celle. Finora abbiamo impostato tutti i modelli in modo da poter rendere l'analisi flessibile ed adottare differenti scelte. In questo caso, pur volendo attribuire al modello termico una certa duttilità, va definito un sistema di raffreddamento. Nello specifico, considerando sia un'ottica rifrattiva che una riflessiva e configurazioni sia point che line – focus, viene impostato lo scambio termico adottando uno schema generale come osservato in Figura IV.11.

Sostanzialmente, l'idea che viene mantenuta in tutte le configurazioni del sistema CPV/T è quella di alloggiare le celle, tramite un collante (resina), su un tubo coibentato all'interno del quale fluisce il fluido termo – vettore.

Tale schema base, viene impiegato sia con una disposizione point – focus che con una line – focus, ciò che cambia è la distanza tra le celle e la concentrazione incidente. Si può inoltre notare come, il motore per tutto lo scambio sia la radiazione concentrata incidente che porta all'aumento della temperatura della cella e permette di configurare lo scambio. Sono stati realizzati differenti modelli termici. In primo luogo, volendo valutare le

potenzialità termiche del sistema, si è elaborato un modello analitico di tipo stazionario.

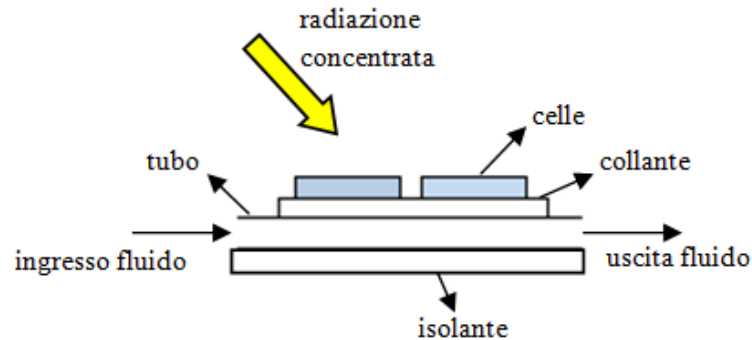


Figura IV.11 Schema base per lo scambio termico

Successivamente, sono stati implementati dei modelli in regime transitorio attraverso l'impiego del software Ansys, per l'analisi della temperatura del fluido termovettore, con diverse configurazioni. L'analisi, pur volendo generalizzare il modello per adattarlo a differenti configurazioni, deve comunque tener conto delle dimensioni del circuito, pertanto in primo luogo si osserverà la modellazione del sistema di raffreddamento, fornendo alcune misure preliminari, in seguito si vaglieranno i differenti modelli. Nello specifico, l'analisi si articola in:

- modellazione preliminare del circuito;
- modello stazionario per la stima della producibilità termica;
- modello transitorio semplificato con configurazione point – focus per la valutazione della temperatura del fluido;
- modello transitorio completo per configurazioni point e line – focus per la stima della temperatura del fluido e l'analisi comparativa.

In questa fase analizziamo prima il circuito ed il modello stazionario, mentre successivamente, vista la natura transitoria del problema, analizzeremo gli altri modelli, fino a giungere ad un confronto tra le soluzioni.

4.7.1. Modello preliminare del circuito di raffreddamento

La presenza di un sistema di raffreddamento attivo costituisce l'elemento chiave per la definizione di un sistema CPV/T che, quindi, provvede anche alla produzione di energia termica. Come visto nel paragrafo precedente, qualunque sia la configurazione, sistema prevede la presenza di un circuito nel quale fluisce il fluido termovettore che ha il duplice compito di

Capitolo 4

raffreddare le celle, in modo da mantenere buone prestazioni elettriche, ed ottenere energia termica. Tale circuito deve essere dimensionato, definendo le principali caratteristiche in modo da poter ottenere tutti i parametri per le successive analisi termiche sia stazionarie (modello analitico) che transitorie (modello numerico in Ansys). In questa fase ci concentreremo sulla modellazione del circuito

In generale, il materiale utilizzato per il tubo deve essere altamente conducibile, pertanto una scelta logica è il **rame**, il quale ha la capacità di trasmettere rapidamente il calore dalla cella fino al fluido termico – vettore ed è molto impiegato nelle applicazioni solari termiche. Chiaramente, per evitare dispersioni termiche verso l'esterno, il tubo va coibentato. Una buona soluzione è costituita dall' **Aerogel**. Tale permette di isolare le tubazioni ed evitare che il calore venga disperso in ambiente. Dal punto di vista fisico è costruito da un gel nanoporoso rinforzato con fibre di poliestere e fibre di vetro a filamento continuo. Presente sottoforma di feltro, è estremamente flessibile ed indicato in applicazioni con range di temperatura da -200 °C a +200 °C.

Nei punti in cui le celle vanno a contatto con il tubo in rame viene inserita una resina epossidica incollante che serve a collegare meccanicamente la cella e il tubo. Questo materiale ha ottime caratteristiche termiche, opponendo poca resistenza allo scambio termico e riuscendo a lavorare ad altissime temperature.

Il modello del circuito ha come obiettivo l'analisi delle perdite di carico in modo da definire il diametro da adottare in funzione della velocità del fluido. Le perdite di carico possono suddividersi in:

- distribuite;
- concentrate.

Le prime sono quelle che subisce un fluido, in moto attraverso un condotto, a causa delle resistenze continue, dovute agli attriti interni al fluido stesso e agli attriti esterni dovuti alla rugosità del condotto. Le perdite di carico localizzate sono quelle che un fluido, in moto attraverso un condotto, subisce a causa delle resistenze accidentali e delle irregolarità di percorso (riduzioni, allargamenti, curve, valvole e organi di regolazioni).

Le perdite di carico distribuite, essere espresse sia in unità di pressione (pascal o bar), sia in altezza di fluido (metri o millimetri di colonna d'acqua), sono calcolate come:

$$r = F_a \cdot \frac{1}{d} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (\text{IV.28})$$

Dove r è la perdita di carico unitaria (Pa/m), F_a è il fattore di attrito adimensionale, D è il diametro interno del condotto (m), ρ è densità (kg/m^3) e v è la velocità media del fluido (m/s). In tale formula l'unico parametro di

difficile valutazione è il fattore di attrito perché dipende dalle dimensioni e rugosità del condotto e dalla modalità di scorrimento del fluido.

In particolar modo il suo valore cambia in relazione al regime di moto del fluido che può essere laminare o turbolento. Per stabilire il regime del moto si definisce il numero di Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (IV.29)$$

Dove D è la lunghezza caratteristica, nel caso specifico è pari al diametro del tubo, v è la velocità del fluido e ν è la viscosità cinematica del fluido. Per valori di $Re < 2000$, come quelli in impianti di questo tipo, il moto è laminare ed il coefficiente di attrito Fa dipende solo dal numero di Reynolds:

$$Fa = \frac{64}{Re} \quad (IV.30)$$

Posta tale uguaglianza nella formula generale di calcolo, si ottiene:

$$r = 32 \cdot \nu \cdot \rho \cdot \frac{v}{D^2} \quad (IV.31)$$

Normalmente il valore di r viene calcolato in base alla portata di fluido, e non in base alla sua velocità. Conviene pertanto sostituire la velocità v (m/s) con la portata volumetrica \dot{V} (m³/s), secondo la relazione di uguaglianza che lega fra loro queste due grandezze:

$$v = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D^2} \quad (IV.32)$$

Quindi r diviene:

$$r = 40,47 \cdot \nu \cdot \rho \cdot \frac{\dot{V}}{D^4} \quad (IV.33)$$

Stimate le perdite distribuite, vanno analizzate quelle concentrate, solitamente valutate tramite un metodo di calcolo diretto (Caleffi, 2005):

$$z = \xi \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (IV.34)$$

Dove z è la perdita di carico localizzata (Pa), ξ è il coefficiente di perdita localizzata, ρ è la densità (kg/m³) e v la velocità media del fluido (m/s). Il coefficiente di perdita localizzata dipende soprattutto dalla forma della resistenza localizzata. Solitamente, i valori di perdite localizzati sono tabellati in funzione alla tipologia di geometria considerata.

I valori ottenuti dal calcolo delle perdite di carico distribuite e quelle concentrate vengono sommati e si ottiene la perdita di carico complessiva del circuito considerato, la quale è funzione di:

- diametro;
- velocità del fluido.

Capitolo 4

Lo scopo è proprio quello di ottenere il valore del diametro, a seconda delle condizioni dettate dal tipo di sistema a concentrazione. In questo senso si adotta un metodo iterativo, che prevede la scelta di un primo valore del diametro. Si calcolano alcuni parametri operativi, come la portata, e si entra con questo valore all'interno delle tabelle per il calcolo delle perdite di carico distribuite. All'interno delle tabelle è possibile ricavare un valore di resistenza r e di velocità del fluido v , questi valori vengono ripresi e si calcolano tutte le grandezze precedentemente viste finché non si ha convergenza.

Risulta evidente come i parametri del circuito dipendano dal sistema a concentrazione scelto. In questo senso, di volta in volta, nei modelli termici, definito il tipo di configurazione si valutano le caratteristiche del circuito. Nel Capitolo 6, infine, vedremo i risultati operativi per alcuni esempi di sistema a concentrazione. In Figura IV.12, è riportato un esempio di circuito di tipo point – focus con ottica riflessiva (Renno e Petito, 2015).

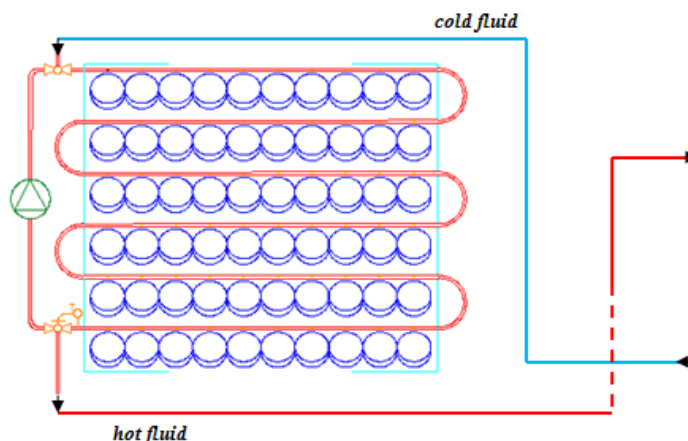


Figura IV.12 Esempio di circuito di raffreddamento point – focus

4.7.2. Modello termico stazionario

Il modello termico stazionario ha come obiettivo la valutazione della producibilità termica di un sistema a concentrazione, partendo da semplici relazioni analitiche che confrontano la parte di energia radiante non convertita in energia elettrica. In questo modo, senza entrare nel merito degli scambi termici, si può valutare indirettamente anche la temperatura del fluido termo – vettore.

In Figura IV.13 si possono osservare i passaggi seguiti in tale fase di modellazione. In generale, la radiazione incidente sul modulo a concentrazione è data:

$$G_{inc,m} = G_{dir} \cdot C \cdot A_c \cdot \eta_{opt} \cdot N_c \quad (IV.35)$$

Dove si tiene conto della concentrazione e del numero di celle.

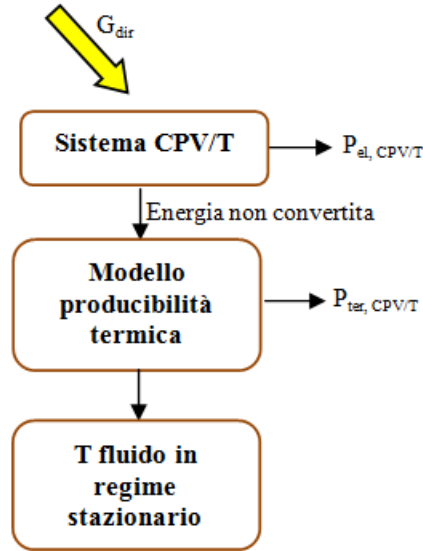


Figura IV.13 Schema del modello stazionario

Pertanto la parte non trasformata in potenza elettrica, considerando la radianza diretta G_{dir} in W/m^2 , è idealmente convertibile in potenza termica. Per ottenere tale frazione non convertita, bisogna esaminare un rendimento elettrico complessivo del sistema ($\eta_{el,CPV/T}$) che tiene conto delle efficienze di cella e modulo (Renno et al., 2015):

$$\eta_{el,CPV/T} = \eta_c \cdot \eta_{modulo} \quad (IV.36)$$

Pertanto, la potenza termica ideale può essere espressa come:

$$P_{ter,id} = (1 - \eta_{el,CPV/T}) G_{dir} \cdot C \cdot A_c \cdot \eta_{opt} \cdot N_c \quad (IV.37)$$

Oppure in forma più compatta come:

$$P_{ter,id} = (1 - \eta_{el,CPV/T}) G_{inc,m} \quad (IV.38)$$

Tale componente rappresenta quindi la parte che potrebbe essere convertita in potenza termica ottenibile dal modulo.

La potenza termica realmente erogabile secondo tale modello stazionario, tuttavia, deve tener conto delle perdite convettive e radiative che il circuito con le celle può avere verso l'ambiente esterno (Renno e Petito, 2015):

$$P_{ter,persa} = [\bar{h}_c \cdot (T_c - T_{ref}) + \varepsilon_c \cdot \sigma_{ST} \cdot (T_c^4 - T_{ref}^4)] \cdot A_c \cdot N_c \quad (IV.39)$$

Capitolo 4

dove ε_c è l'emissività della cella, pari a 0.85 e σ_{ST} è la costante di Stefan – Boltzmann. Quindi la potenza termica reale sarà:

$$P_{ter, reale} = P_{ter, id} - P_{ter, persa} \quad (IV.40)$$

Ed integrando sulle ore di funzionamento del sistema a seconda della radianza diretta incidente, si ottiene l'energia termica erogabile.

Ottenuta la potenza termica erogabile, si fa un discorso indiretto per il calcolo della temperatura del fluido termo – vettore, solitamente una soluzione di acqua e glicole. L'ipotesi principale fatta in questo modello per il calcolo della temperatura è quella di considerare il tubo sotto le celle caratterizzato da una temperatura uniforme in ogni suo punto. In questo senso si configura come una piastra che riscalda il fluido. Quindi la potenza termica calcolata in precedenza può anche essere uguagliata a (Renno e Petito, 2015):

$$P_{ter, reale} = K \cdot (T_c - T_p) \quad (IV.41)$$

dove T_p è la temperatura uniforme della piastra – tubo. Conoscendo le dimensioni del circuito e le conduttività dei materiali, il valore della conduttanza globale K può essere stimato. Pertanto, considerando il tubo come un vero scambiatore di calore alla temperatura T_p , e conoscendo la portata ed il calore specifico del fluido, la sua temperatura all'uscita può essere calcolata come (Renno e Petito, 2015):

$$T_{f, out} = T_p - \frac{T_p - T_{f, in}}{\frac{\bar{h}_c \cdot A_{tot}}{e \cdot m \cdot c}} \quad (IV.42)$$

dove $T_{f, in}$ è la temperatura del fluido all'ingresso del tubo, \bar{h}_c è il coefficiente di scambio termico convettivo tra tubo e acqua e A_{tot} è l'area complessiva del tubo visto come uno scambiatore.

Tale modellazione stazionaria, come visto, presenta delle approssimazioni evidenti, tuttavia, in sede di prima analisi, permette una valutazione complessiva delle potenzialità termiche del sistema CPV/T.

4.8. Modellazione termica del sistema CPV/T in regime transitorio

L'analisi delle prestazioni termiche di un CPV/T è fondamentale per una valutazione complessiva dei sistemi a concentrazione. Infatti, nel modello cogenerativo del sistema, la conoscenza delle prestazioni termiche, accoppiate alla producibilità elettrica, consentono di valutare il soddisfacimento delle esigenze di specifiche utenze. Il modello stazionario, presentato nella sezione precedente, fornisce una misura globale di tale tipo di performance, non consentendo un'analisi puntuale, decisiva per il funzionamento in continuo dell'impianto. In questa sezione si analizzeranno due modelli termici. Il primo basato su una configurazione point – focus,

funge da tentativo iniziale di modellazione transitoria. Il secondo, permette di generalizzare le conclusioni del primo e valutare indifferentemente sia una configurazione point che una configurazione line – focus. Pertanto, visto che l'obiettivo di questo elaborato è proprio quello di fornire gli strumenti per una valutazione quanto più indipendente possibile da uno schema preciso, il secondo modello è l'evoluzione definitiva di tutta la fase di analisi termica, presentata in questa sezione.

Per lo studio transitorio del problema, si è impiegata una modellazione grafica sfruttando sia Catia (Catia, Dessault systems) che SolidWorks (SolidWorks Corp.), mentre la fase di modellazione e risoluzione numerica è stata svolta, come detto in precedenza, con l'ausilio di Ansys (release 16.2, ANSYS INC.).

4.8.1. Modello termico transitorio per un sistema point – focus

Il modello, presentato in questa sezione, sfrutta un modello agli elementi finiti costruito in Ansys, per valutare in ogni condizione ed ogni istante di funzionamento, la temperatura del fluido termovettore nel circuito di raffreddamento. I principali aspetti del modello sono:

- Definizione del circuito in Catia, con una configurazione point – focus;
- Impiego delle temperature della cella valutate sia in maniera sperimentale che teoricamente;
- Definizione del modello di scambio termico;
- Risoluzione numerica in Ansys.

In primo luogo, si è definito il circuito, realizzandolo graficamente in Catia, come riportato in Figura IV.14. In questa fase di modellazione, si è vagliata la possibilità di un primo approccio all'analisi termica transitoria con uno schema point – focus. Tale configurazione, risulta adattabile sia ad ottiche riflettive che ottiche rifrattive, la principale problematica è legata al fatto che, avendo ogni cella un'ottica dedicata, quest'ultime risultano abbastanza distanti le une dalle altre. Nello specifico, nella Figura IV.14 è mostrato un circuito con 60 celle disposte su 6 file, la distanza tra le celle è di circa 26 cm.

Lo studio delle dinamiche termiche del sistema inizia con la definizione della temperatura della cella, in questo caso, si sono usati sia i risultati sperimentali che quelli teorici, relativi a tale parametro.

L'aspetto innovativo di questo modello è legato alla definizione di equazioni per lo scambio termico in regime transitorio, considerando le varie parti del circuito, e la risoluzione numerica con un software agli elementi finiti.

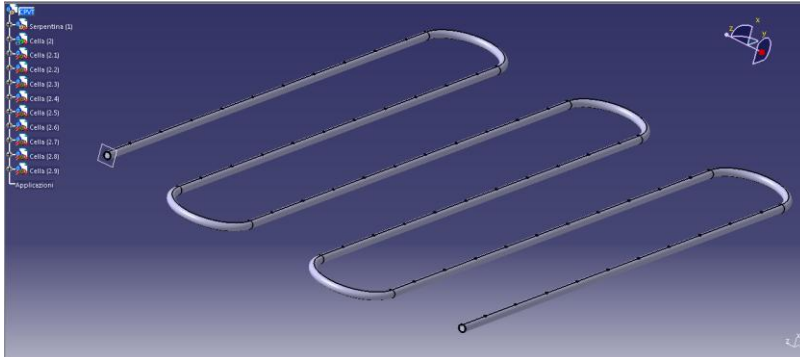


Figura IV.14 Circuito point – focus in Catia

4.8.1.1. Modello termico

I bilanci di energia generali, impiegati per modellare lo scambio tra tubo e fluido termo – vettore sono rappresentati dalle seguenti equazioni (Renno e Petito, 2016):

$$m_t c_t \frac{\partial T_t}{\partial \theta} = A_t K_t \frac{\partial^2 T_t}{\partial x^2} + \alpha A_t G - \pi d_o \bar{h}_a (T_t - T_a) - \pi d_i \bar{h}_i (T_t - T_f) \quad (IV.43)$$

$$m_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial \theta} + \dot{m}_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = \pi d_i \bar{h}_i (T_t - T_f) \quad (IV.44)$$

Dove α è il coefficiente di assorbimento della cella (Mastrullo e Renno, 2010), T_t e T_f sono rispettivamente le temperature del tubo e del fluido, G è la radiazione incidente, d_i il diametro interno del tubo e con \bar{h} sono indicati i vari coefficienti di scambio termico convettivo, sia dal lato fluido che dal lato aria.

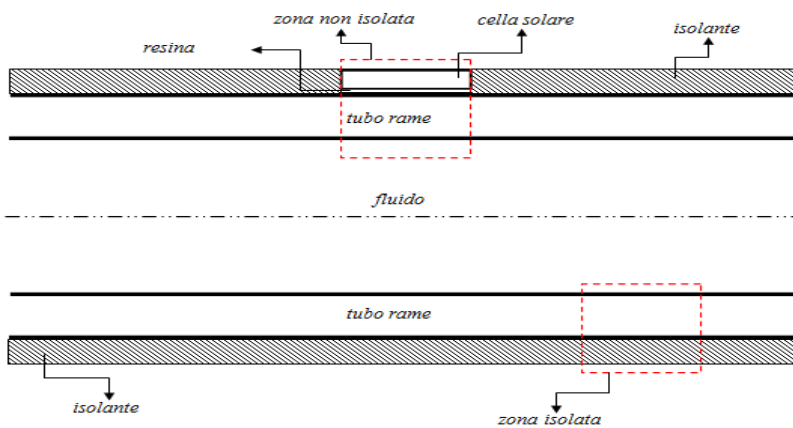


Figura IV.15 Schema delle parti dello scambio termico

In generale, la radiazione solare concentrata sulle celle determina il riscaldamento prima del tubo sotto le celle e poi del fluido. In questo caso, come nel modello generale del circuito, si impiega l'Aerogel come isolante, ed un tubo in rame. In Figura IV.15 si possono osservare sia la zona isolata del tubo che quella non isolata. Stabilite le dimensioni e le conducibilità per cella, tubo, resina ed isolante, si possono calcolare tutte le resistenze termiche e il valore di conduttanza globale. Quindi per la fase di risoluzione numerica è fondamentale impostare il modello alle resistenze termiche illustrato in Figura IV.16.

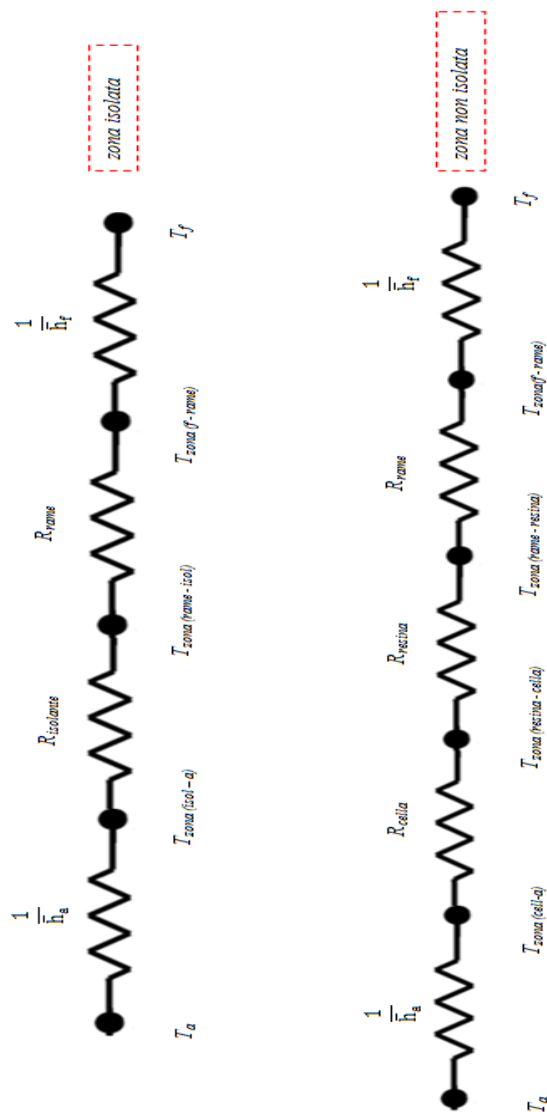


Figura IV.16 Modello delle resistenze termiche

4.8.1.2. Risoluzione numerica

Il modello termico della sezione precedente è stato simulato impiegando il software ANSYS CFX (Ansys Corp.) al fine di valutare la temperatura del fluido in differenti condizioni. Prima di tutto, sfruttando il circuito realizzato in Catia, riportato in Figura IV.14, sono state selezionate le differenti superfici di scambio, definendo tre domini computazionali. Celle e tubo sono domini solidi, rispettivamente in rosso e giallo, e il fluido è un dominio liquido, in blu, come riportato in Figura IV.17.

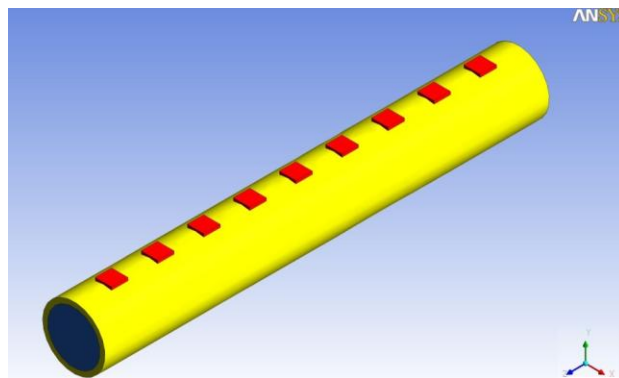


Figura IV.17 Definizione dei domini computazionali

Al fine di risolvere il modello numerico, si è applicata un'opportuna mesh. In particolare la fase di meshing ha previsto la definizione di elementi finiti tetraedrici, che presentano più alta densità nelle zone di maggiore interesse per lo scambio termico (Renno e De Giacomo, 2014).

I fenomeni di scambio termico nelle differenti condizioni di lavoro, zona isolata e non isolata, sono stati valutati impiegando le appropriate condizioni al contorno sulle superfici di scambio, definite nel modello CFX.

Le celle, come detto, sono state fissate al tubo con una resina epossidica di spessore pari a $3 \cdot 10^{-3}$ m.

L'isolante, rappresentato dall'aerogel, presenta conducibilità e spessore pari rispettivamente a 0.014 W/mK e $5 \cdot 10^{-3}$. Il modello di resistenze termiche permette di definire i coefficienti di scambio termico conduttivo e convettivo impiegati nella risoluzione numerica. In particolare, un coefficiente di scambio termico convettivo pari a 6.45 W/m² K è stato fissato per lo scambio con l'aria esterna.

La definizione dei domini permette di semplificare il modello di resistenze termiche; le superfici di scambio termico nel modello computazionale si riducono, infatti, a tre nella zona non isolata. Pertanto, differenti valori di resistenza equivalente sono stati impiegati come condizioni al contorno. La prima tiene in considerazione lo scambio

convettivo tra aria e celle. La seconda valuta la resistenza serie tra celle, resina e rame; mentre la terza impone lo scambio convettivo tra rame e fluido. Allo stesso modo, per la zona isolata, i domini computazionali si riducono a due. Pertanto si necessita di solo due condizioni al contorno che tengono conto delle resistenze termiche calcolate in Tabella IV.5.

Tabella IV.5 Valori di resistenza termica del primo modello

	<i>Spessore</i> [m]	<i>Conducibilità</i> [W/mk]	<i>Resistenza termica</i> [m ² K/W]
<i>Cella</i>	1.00 E-03	148	6.76 E-06
<i>Rame</i>	3.00 E-03	390	7.70 E-06
<i>Resina</i>	1.00 E-4	1.38	7.25 E-05
<i>Isolante</i>	1.00 E-3	0.014	0.36 E+00

I valori riportati in Tabella IV.5, rappresentano un primo esempio per la risoluzione, la potenza del modello risiede nel fatto che tali parametri possono essere modificati a seconda delle condizioni.

Allo stesso modo, per procedere alla risoluzione, si è considerata una velocità del fluido di 0.38 m/s, con un diametro interno del tubo di 3.0 cm, mentre la temperatura di ingresso dell'acqua è stata fissata a 12 °C.

La temperatura dell'aria esterna, nelle diverse simulazioni è stata variata tra 10 and 35°C mentre la radiazione incidente è compresa tra 500 W/m² and 900 W/m². Al fine di ottenere il campo di soluzioni della temperatura del fluido si è impiegato un criterio di convergenza nell'ordine di 10⁻⁴ per le equazioni di continuità e del momento, mentre per l'equazione dell'energia il criterio è di 10⁻⁵. Il modello computazionale prevede che la simulazione duri per tutto il periodo in cui è presente la radiazione, al fine di osservare il comportamento della temperatura del fluido in diverse ore. Il time step impiegato è di un secondo. Tale modello costituisce un primo tentativo di modellare le prestazioni termiche del sistema CPV/T in transitorio. I risultati ottenuti sono mostrati nel Capitolo 6.

4.8.2. Modello termico transitorio generale e confronto:

configurazioni point e line – focus

Un sistema CPV/T è la combinazione di diverse tecnologie. In particolare, le celle triple giunzione permettono di raggiungere valori di efficienza più elevati e di migliorare la risposta della cella nel lavorare ad alte temperature.

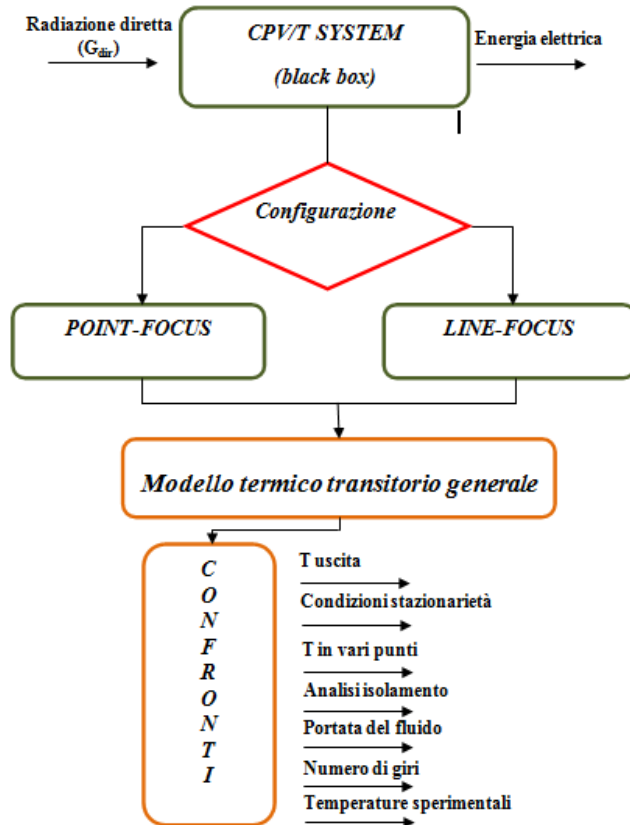


Figura IV.18 Schema del modello termico generale di confronto

Sia le prestazioni elettriche che termiche dipendono dal fattore di concentrazione; tuttavia mentre le prime sono meno influenzate dalla configurazione, le seconde, non possono prescindere dallo schema di circuito selezionato. Quindi, il sistema a concentrazione può essere visto inizialmente come una black – box dove, a seconda della radiazione incidente, della concentrazione e del numero di celle, si ottiene energia elettrica. Dal punto di vista termico, invece, è necessario definire una configurazione che caratterizzi il circuito di raffreddamento.

In questa sezione, riprendendo in parte il modello transitorio precedente, si vuole offrire un modello termico generale che a seconda della configurazione scelta, consenta una valutazione delle prestazioni del sistema soprattutto per quel che riguarda la temperatura del fluido termo – vettore, come riportato in Figura IV.18. In particolare, questo modello prevede:

- Definizione degli schemi line e point – focus;
- Nuova definizione degli scambi termici, in modo da poter generalizzare il discorso tra le configurazioni;

- Modellazione grafica in SolidWorks e risoluzione numerica in Ansys;
- Confronto tra gli schemi in base a molteplici parametri.

4.8.2.1. Definizione delle configurazioni analizzate

Il primo passo nella definizione del modello termico generale è la definizione delle configurazioni. Con l'obiettivo di voler analizzare sia il caso point che il caso line – focus, con un modello unico che consenta anche il confronto, sono stati definiti due circuiti equivalenti, come mostrato in Figura IV.19 e IV.20.

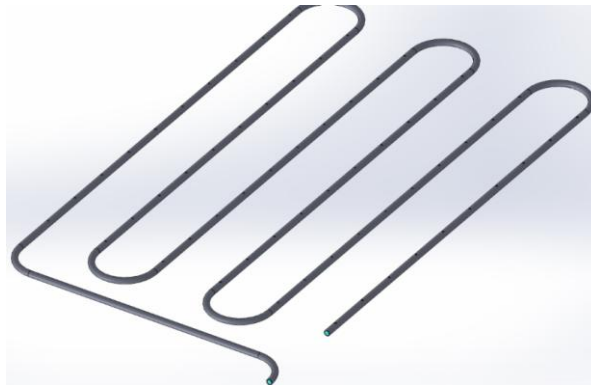


Figura IV.19 Circuito point – focus del modello generale

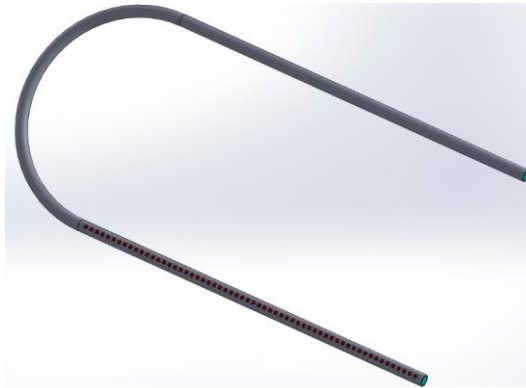


Figura IV.20 Circuito line – focus del modello generale

I due circuiti sono equivalenti in quanto prevedono lo stesso numero di celle, 60, e presentano entrambi un'ottica riflessiva. Il numero di celle, può essere variato senza problemi, la definizione però è importante per poter avviare le successive fasi di simulazione numerica. Entrambe le configurazioni adottano una resina epossidica per il contatto delle celle sul tubo, mentre il

Capitolo 4

coibente, in Aerogel, viene variato nello spessore per conferire maggiore flessibilità al modello. Allo stesso modo, il diametro interno è stato fissato a 4.2 cm, ma l'analisi consente di variarlo, infatti è previsto che la portata di fluido non sia costante proprio per generalizzare ancor di più la modellazione. Nel sistema line – focus, le 60 celle sono disposte lungo una linea di 1230 mm e, considerando tutti i raccordi la lunghezza totale del circuito è pari a 3.56 m. Nel sistema point – focus le celle sono disposte su sei file da 2700 mm, considerando tutti gli incroci la lunghezza totale del circuito è pari a 21.77 m.

4.8.2.2. Modello termico transitorio equivalente

L'analisi dello scambio termico tiene conto delle due configurazioni specifiche. Sebbene le stesse condizioni siano state considerate in termini di fattore di concentrazione, tipo e numero di celle, e dei materiali utilizzati per il tubo e l'isolamento, la configurazione geometrica degli schemi presentati richiede un'analisi differente. Pertanto, diversi bilanci energetici sono considerati, valutando sia la zona non coibentata dove sono presenti le celle, sia la zona isolata. Tale distinzione è fondamentale per regolamentare lo scambio termico. Nella configurazione point – focus, la radiazione incidente viene concentrata solo sulle celle e non lungo l'intero tubo. Inoltre, la distanza tra due celle è maggiore rispetto alla configurazione line – focus. Al contrario, quest'ultimo schema permette la concentrazione lungo una linea che considera sia le celle che il tubo, in funzione della lunghezza del concentratore e la distanza tra le celle viene, inoltre, ridotta.

In Figura IV.21, un modello univoco di scambio termico viene presentato, indicando diversi volumi di controllo (cv) al fine investigare le diverse situazioni.

In particolare, lo scambio termico tra cella, tubo e fluido di posto al di sotto delle celle, rappresentata dai CV1 e CV2, sono espressi rispettivamente con le equazioni seguenti (Renno et al., 2017):

$$\rho_c V_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial \theta} = C I_{dir} A_c \alpha_c - \pi d_e \bar{h}_e (T_c - T_a) - A_c K_c (T_c - T_t) \quad (IV.45)$$

$$A_c K_c (T_c - T_t) + A_t K_t \frac{\partial^2 T_t}{\partial x^2} = \pi d_i \bar{h}_i (T_t - T_f) + \rho_t V_t c_t \frac{\partial T_t}{\partial \theta} \quad (IV.46)$$

dove α è il coefficiente di assorbimento della cella solare, C è il fattore di concentrazione, T_c , T_a , T_t e T_f sono rispettivamente la temperatura della cella, ambiente, tubo e del fluido. K rappresenta la conduttanza globale di cella (K_c) e del tubo (K_t), mentre \bar{h}_e e \bar{h}_i sono i coefficienti di scambio termico convettivo con l'ambiente da un lato, e con il fluido refrigerante dall'altro.

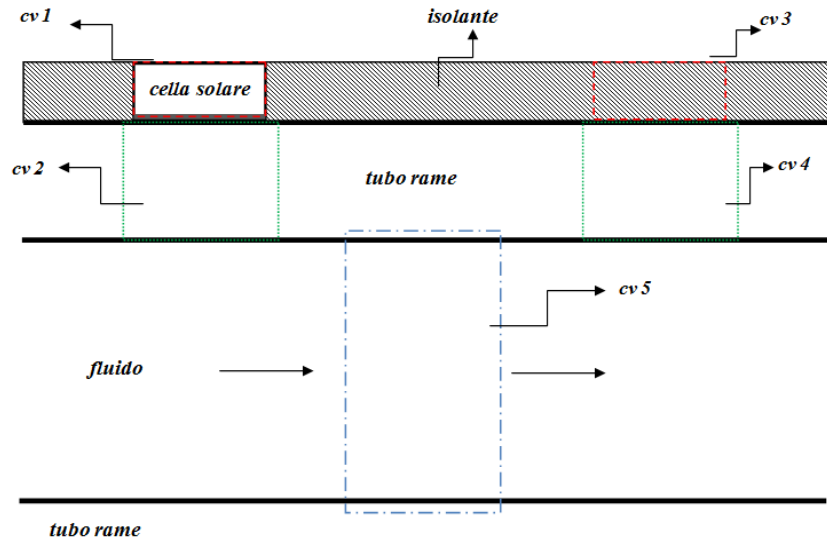


Figura IV.21 Volumi di controllo per l'analisi termica

I bilanci energetici nella zona isolata, rappresentati dai CV3 e CV4, sono espressi come (Renno et al., 2017):

$$C_{I_{dir}} A_{ins} \alpha_{is} + A_{is} K_{is} \frac{\partial^2 T_{ins}}{\partial x^2} = A_{is} K_{is} (T_{is} - T_t) + \pi d_e \bar{h}_e (T_{is} - T_a) + \rho_{is} V_{is} c_{is} \frac{\partial T_{is}}{\partial \theta} \quad (IV.47)$$

$$A_{is} K_{is} (T_{is} - T_t) + A_t K_t \frac{\partial^2 T_t}{\partial x^2} = \pi d_i \bar{h}_i (T_t - T_f) + \rho_t V_t c_t \frac{\partial T_t}{\partial \theta} \quad (IV.48)$$

dove α_{is} e T_{is} indicano rispettivamente l'assorbimento e la temperatura dell'isolante. Va osservato che rispetto al modello precedente, in questo caso compare anche il fattore di concentrazione. In particolare modo, la concentrazione per la configurazione point – focus, nella zona isolata tra le celle, è uguale a zero. Inoltre, la maggiore distanza tra le celle fornisce maggiori perdite di calore rispetto alla configurazione line – focus. In questo caso, infatti, la luce è concentrata anche sulla zona isolata tra le celle.

Infine, il bilancio energetico riferito al fluido (CV5) è:

$$\dot{m}_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + \pi d_i \bar{h}_i (T_t - T_f) = \dot{m}_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial \theta} \quad (IV.49)$$

Capitolo 4

Dove \dot{m}_f e c_f sono rispettivamente la portata e il calore specifico del fluido. Per entrambe le configurazioni il modello termico può essere espresso come una serie di resistenze termiche. La radiazione diretta incidente è principalmente focalizzata sulle celle a tripla giunzione. Questo permette il riscaldamento del tubo, posizionato immediatamente sotto le stesse, e quindi del fluido. L'isolante, per entrambe le configurazioni, è utilizzato al fine di evitare dispersioni di calore, anche se, nello schema line – focus, partecipa parzialmente al riscaldamento del tubo. Una volta note le dimensioni e la conducibilità della cella, del tubo, e dell'isolante, i valori di resistenze termiche e quindi il valore di conduttanza globale possono essere, ancora una volta, determinati. In questo modo si può procedere con la valutazione della temperatura del fluido nelle diverse condizioni.

4.8.2.3. Soluzione numerica e condizioni al contorno

L'analisi termica per le due configurazioni è stata, ancora una volta, realizzata tramite il software Ansys, considerando alcune ipotesi iniziali. Il modello numerico è stato adattato al modello fisico reale al fine di valutare l'andamento della temperatura del fluido nelle due configurazioni in modo da ridurre i tempi di calcolo.

La risoluzione prevede, dopo aver modellato le geometrie di interesse, prima la selezione della mesh e poi la soluzione delle equazioni che governano il sistema unitamente alle condizioni al contorno.

Le ipotesi iniziali riguardano il fattore di concentrazione e le caratteristiche delle celle. In particolare, uno stesso valore di C , risultante dall'analisi sperimentale del Capitolo 5, è stato considerato. Allo stesso modo, si è considerato celle di stesse dimensioni con uguale efficienza (ancora una volta ottenuta in fase sperimentale)..

Infine, anche la temperatura della cella è stata imposta univocamente, considerando valori compresi tra 50 e 90°C e misure sperimentali. Le altre condizioni al contorno utilizzate sono:

- velocità variabile di fluido alla sezione di ingresso del tubo;
- pressione atmosferica in corrispondenza della sezione di uscita;
- temperatura di 12°C nella sezione di ingresso del fluido;
- condizioni di assenza di slittamento e penetrazione sulle pareti del tubo;
- temperatura esterna di 25° C;
- radiazione solare tra 500 W/m² e 900 W/m².

La fase di calcolo prevede la definizione dei domini, come mostrato nelle Figure IV.22 e IV.23.

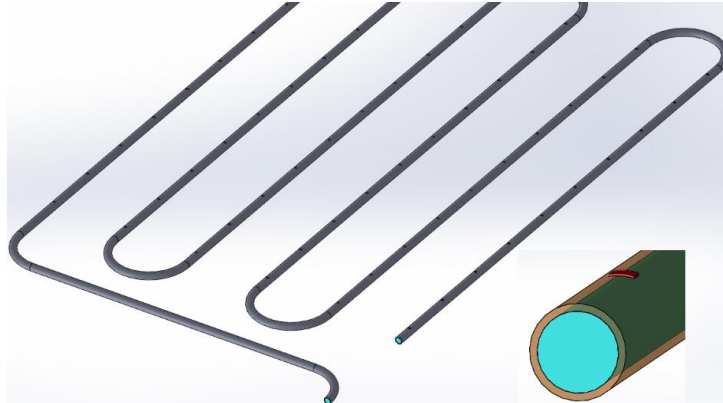


Figura IV.22 Domini per la configurazione *point – focus*

Come mostrato, le celle in rosso ed il tubo in arancione sono indicati come dominio solido, mentre il fluido, in blu, è un dominio del fluido. Ancora una volta, la risoluzione del modello numerico prevede una mesh con elementi tetraedrici. I processi di scambio termico considerano sia fenomeni conduttivi che convettivi. Pertanto, sia per la zona delle celle che per la zona di isolata, sono state impostate condizioni al contorno sulle superfici di scambio termico, nel software CFX.

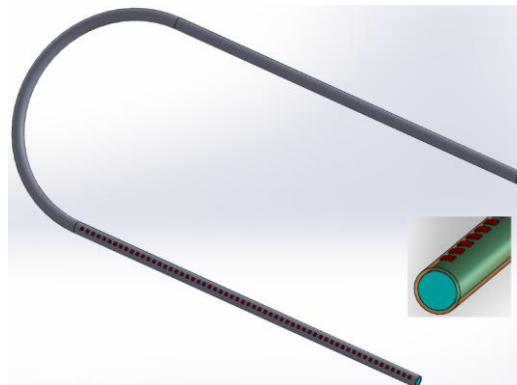


Figura IV.23 Domini per la configurazione *line – focus*

In Tabella IV.6 sono mostrati tutti i valori di spessore e conducibilità considerati. In particolare va osservato come l'isolante presenti uno spessore e quindi una resistenza variabile.

Un coefficiente di scambio convettivo pari a $5.85 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ è stato considerato per lo scambio con l'aria esterna. Infine, si è impostata una condizione di conservazione del flusso. Ancora una volta, grazie al modello di resistenze termiche, è possibile approssiare alla risoluzione numerica.

Tabella IV.6 Valori di resistenza termica per il modello generale

	<i>Spessore [m]</i>	<i>Conducibilità [W/mk]</i>	<i>Resistenza termica [m² K/W]</i>
<i>Cella</i>	1.00 E-03	148	6.76 E-06
<i>Rame</i>	3.00 E-03	401	7.48 E-06
<i>Resina</i>	1.00 E-4	1.38	7.25 E-05
<i>Isolante</i>	da 5.00 E-3 a 15.0 E-3	0.014	variabile

Nella zona delle celle, il modello tiene conto del coefficiente di scambio termico convettivo tra aria e celle, la resistenza serie tra cella, resina epossidica e rame, e la condizione di scambio termico convettivo tra il tubo ed il fluido. Nella zona isolata, il modello termico considera la resistenza serie tra coibente e rame, ed il coefficiente di scambio termico convettivo tra tubo e fluido. Per velocizzare i tempi di calcolo e viste le buone prestazioni del modello, il time step considerato è di 15 s. La soluzione del campo di temperatura presenta due criteri di convergenza: 10^{-4} per le equazioni di continuità e momento, e 10^{-5} per l'equazione dell'energia.

Il modello computazionale simula l'andamento della temperatura del fluido nei due sistemi CPV/T fino al raggiungimento della condizione di regime. Inoltre, altre simulazioni sono state ottenute imponendo valori sperimentali della temperatura della cella. In questo caso, le simulazioni tengono conto del periodo di tempo in cui sono disponibili i valori sperimentali. Tutti i risultati sono mostrati nel Capitolo 6.

4.8.2.4. Confronti e simulazioni

Il confronto delle prestazioni termiche tra le due configurazioni è stato condotto considerando condizioni diverse. Principalmente, come detto, si è considerato una temperatura delle celle uniforme impostata su valori che variano da 50 a 90°C. In queste condizioni, sono stati valutati diversi parametri:

- (1) le temperature di uscita del fluido;
- (2) la differenza di temperatura in corrispondenza della sezione di uscita tra il fluido e le celle;
- (3) il tempo necessario per raggiungere uno stato stazionario;
- (4) l'evoluzione della temperatura del fluido considerando la zona che va dalle celle all'isolante;

- (5) l'evoluzione della temperatura del fluido lungo il diametro del tubo nella zona della cella;
- (6) numero di giri del circuito per raggiungere una determinata temperatura di set point;
- (7) la temperatura al variare della velocità del fluido, e quindi della portata;
- (8) la temperatura al variare dello spessore dell'isolante.

In particolare, la velocità del fluido è stata cambiata da 0,2 m/s a 0,4 m/s fino 0,9 m/s. Lo spessore è stato modificato tra 0,5 cm e 1,5 cm. Infine, si sono considerate le prestazioni impiegando misure sperimentali della temperatura della cella considerando diverse ore di un giorno nuvoloso e di uno soleggiato. Tutti i risultati sono riportati nel Capitolo 6.

4.9. Modello integrato

Le fasi di modellazione analizzate finora, sono orientate a definire il comportamento del sistema termico – fotovoltaico a concentrazione, a prescindere da qualsiasi tipo di esigenza. Infatti, si è osservato come molte variabili siano state lasciate libere, in modo da poter generalizzare il discorso per qualsiasi tipo di sistema CPV/T, sia per tipologie di elementi impiegati sia per estensione del sistema.

Risulta pertanto evidente che, nell'analisi finale di un sistema a concentrazione debba essere considerato lo scopo principale per cui l'impianto viene analizzato. In questo senso, possiamo introdurre quello che chiamiamo sistema integrato e che prevede la valutazione del sistema CPV/T in funzione dell'utenza da soddisfare. In Figura IV.24 possiamo osservare le principali fasi del modello integrato.

Il modello integrato riassume tutte le fasi per la definizione, analisi del funzionamento ed implementazione di un sistema CPV/T in funzione dell'utenza da soddisfare. Finora, abbiamo principalmente osservato le prime due fasi. La definizione dell'input, quindi del potenziale solare, permette di valutare le prestazioni elettriche e termiche del sistema CPV/T, considerando varie configurazioni ed elementi costitutivi. Coinvolgendo l'utenza nel discorso di modellazione complessivo, si introducono una serie di problematiche che hanno diretta incidenza sulla definizione e funzionamento del sistema a concentrazione.

Nello specifico, in funzione delle esigenze dell'utenza, in termini di fabbisogni, spazi disponibili e costi, è possibile scegliere le caratteristiche del sistema CPV/T. In questo senso, parliamo di modello di scelta. Infatti, le fasi di modellazione viste finora, hanno fornito gli strumenti per analizzare un sistema a concentrazione, definendo le richieste da soddisfare, si possono indicare i valori di alcune delle variabili libere ed affrontare i casi studio specifici.

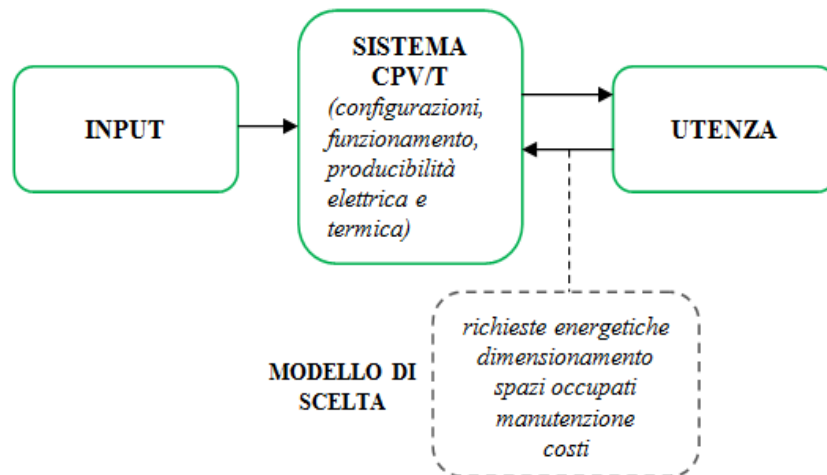


Figura IV.24 Fasi del modello integrato

In questa fase, rimanendo nell'ambito della modellazione, ci limitiamo a fornire gli strumenti per modellare il sistema integrato dal punto di vista dell'utenza. In questo modo, nel Capitolo 6, a seconda delle specifiche richieste, si mostreranno i risultati ottenuti.

In particolare, il modello integrato prevede:

- analisi dei fabbisogni;
- analisi di possibili soluzioni;
- modello di scelta;
- modello di costo ed impatto ambientale.

4.9.1. Possibili richieste energetiche dell'utenza

La definizione del sistema a concentrazione, al fine di analizzare il suo funzionamento, necessita l'ipotesi di condizioni di carico, stabilite dall'utenza. Con riferimento principale ad un'utenza di tipo residenziale, anche se il discorso è estendibile a qualsiasi tipo di applicazione, le principali richieste energetiche sono:

- richiesta di energia termica per usi igienico – sanitari;
- richiesta di energia termica per il riscaldamento;
- richiesta di energia elettrica;
- richiesta di energia frigorifera.

In funzione dei differenti scenari considerati è possibile soddisfare tutti i fabbisogni energetici in maniera alternativa. Al fine di caratterizzare l'utenza

nel tempo è anche necessario conoscere la distribuzione della richiesta nei giorni e durante l'anno in maniera da considerare delle simulazioni relative ad uno scenario invernale e ad uno estivo.

4.9.1.1 Richiesta di acqua calda sanitaria

Per la stima della richiesta di acqua calda sanitaria è possibile fare riferimento alla norma UNI TS 11300 (CTI, 2014). Questa norma ci consente di definire l'energia termica richiesta, in un anno, per soddisfare il fabbisogno di acqua calda sanitaria in funzione del volume di acqua richiesto e della differenza fra le temperature di erogazione e dell'acqua fredda in ingresso:

$$Q_w = \rho_w \times c_w \times V_w \times (\theta_{er} - \theta_0) \times G \quad (IV.50)$$

dove: ρ_w è la densità dell'acqua, c_w è il suo calore specifico, V_w , è il volume di acqua giornaliero, θ_{er} è la temperatura di erogazione dell'acqua per l'i-esima attività o servizio (40°C), θ_0 è la temperatura dell'acqua fredda in ingresso, G è il numero di giorni del periodo di calcolo considerato.

θ_0 è pari alla media annuale delle temperature medie mensili dell'aria esterna della località considerata, mentre per gli edifici residenziali il volume di acqua richiesto V_w , espresso in litri/giorno, è calcolato come:

$$V_w = a \times S_u + b \quad (IV.51)$$

dove a e b sono due parametri funzione della superficie utile S_u , come riportato in tabella IV.7

Tabella IV.7 Prospetto valori parametri

Superficie utile (S_u) [m^2]	$S_u \leq 35$	$35 < S_u \leq 50$	$50 < S_u \leq 200$	$S_u > 200$
Parametro a [l/m^2 giorno]	0	2.667	1.067	0
Parametro b [$l/giorno$]	50	-43.33	36.67	250

Per simulare un prelievo giornaliero di acqua calda sanitaria (acs), per un giorno invernale ed uno estivo è necessario avere la distribuzione del prelievo di acs nella giornata e la ripartizione del consumo annuo tra inverno ed estate. I consumi di acs, spesso, vengono considerati costanti nell'anno in quanto essi non dipendono dalla stagionalità ma dalle abitudini igieniche.

Capitolo 4

Invece, per quanto riguarda la distribuzione nella giornata dei consumi di acs si deve far riferimento ai casi specifici, volta per volta, come vedremo nel Capitolo 6.

4.9.1.2. Riscaldamento e refrigerazione

La stima dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento, coinvolge periodi differenti e quindi, prestazioni del sistema a concentrazione diverse. Al fine di valutare tali richieste energetiche, soprattutto per un'utenza di tipo domestico, viene adoperato il software DOCET (ENEA), il quale rappresenta uno strumento di simulazione a bilanci mensili per la certificazione energetica degli edifici residenziali esistenti.

Il punto di forza di questo software è quello di riuscire a coniugare semplicità e accuratezza fornendo sia una stima dei fabbisogni annua che un suo andamento nell'anno.

Un esempio di richieste può essere osservato in Figura IV.25, dove per l'ottenimento dei fabbisogni annui è stato necessario indicare parametri come la provincia, i gradi giorno, la fascia climatica, l'anno di costruzione dell'edificio, le dimensioni, il numero di livelli, l'altezza dell'appartamento, il coefficiente di scambio termico delle pareti e del tetto, ecc.

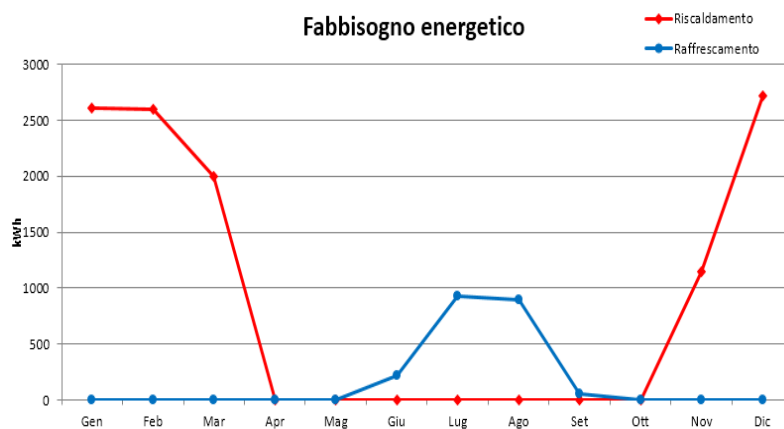


Figura IV.25 Esempio di consumi per riscaldamento e raffrescamento

Come nel caso precedente, i consumi vanno distribuiti nelle giornate a seconda del tipo di utenza.

4.9.1.3. Fabbisogno elettrico

La stima dell'energia elettrica necessaria all'utenza è stata fatta considerando valori medi annuali dei consumi in relazione alla taglia (in m²) dell'utenza ed

alla fascia climatica di appartenenza (CTI, 2014), come riportato, ad esempio in Tabella IV.8.

La distribuzione giornaliera di tali fabbisogni, dipende ancora una volta dal tipo di caso affrontato. Chiaramente, sulla richiesta elettrica estiva va a gravare l'eventuale soddisfacimento delle richieste di refrigerazioni tramite dispositivi elettrici.

Tabella IV.8 *Coefficienti per il fabbisogno di energia elettrica*

Tipologia Fabbisogno / Fascia climatica	B	C	D
<i>Energia Elettrica (kWh/m²/y)</i>	27,79	29,06	34,13

4.9.2. Eventuale serbatoio di accumulo

L'analisi delle esigenze dell'utenza che il sistema CPV/T va a servire porta allo studio di soluzioni di accumulo per l'energia termica. Infatti, l'energia termica ottenuta attraverso il circuito di raffreddamento, deve poter essere immagazzinata in quanto non è detto ci sia contemporaneità con le richieste. Solitamente, a tali scopi si impiega un serbatoio stratificato, ovvero in cui esiste una differenza di temperatura tra l'acqua contenuta in cima e quella sul fondo.

La stratificazione aumenta la frazione d'acqua disponibile alla temperatura utile per la consegna e coinvolge fenomeni sia di convezione naturale che forzata.

Il fluido freddo, prelevato dal fondo del serbatoio, viene inviato al circuito di raffreddamento delle celle, che lo riscaldano, e introdotto nuovamente nella parte alta del serbatoio ad una temperatura maggiore. Il flusso scenderà fino a raggiungere un livello in cui la densità del fluido circostante sarà pari alla sua.

Per effetto della gravità e del galleggiamento, l'acqua a diverse temperature si depositerà ad un'altezza corrispondente in funzione della sua densità: l'acqua calda, con densità inferiore, rimarrà negli superiori, mentre l'acqua fredda va verso il fondo.

La regione intermedia (termo – cline), come riportato in Figura IV.26, presenta un elevato gradiente di temperatura ed agisce come barriera fisica ostacolando il mescolamento tra il fluido caldo e quello freddo. Il mantenimento della stratificazione nel serbatoio è essenziale per l'efficienza del sistema in cui esso è integrato. Infatti, la stratificazione, consente di:

- avere un funzionamento più efficiente delle celle solari grazie al loro raffreddamento;

Capitolo 4

- ridurre le perdite termiche verso l'ambiente per effetto della minore temperatura media del serbatoio.

Il comportamento di un accumulo stratificato dipende dalle caratteristiche geometriche del serbatoio (volume, rapporto altezza-diametro), dalla dimensione e posizionamento degli ingressi e delle uscite, dalle portate e velocità dei flussi entranti, dalla differenza di temperatura tra i flussi in ingresso e il liquido nel serbatoio. Pertanto, il serbatoio va dimensionato a seconda dell'applicazione e ne va valutato il suo funzionamento.

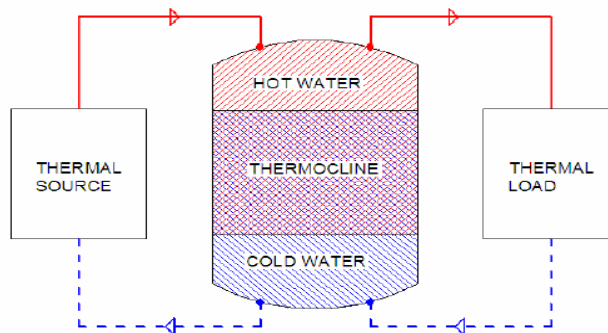


Figura IV.26 Schema di un serbatoio

4.9.2.1. Dimensionamento e funzionamento del serbatoio

Il dimensionamento del serbatoio deve considerare la contemporaneità dei prelievi di acqua calda nel periodo di punta. Il dimensionamento prevede:

1. determinare il volume di accumulo;
2. calcolare la superficie dei serpentini riscaldanti;
3. scegliere la taglia in funzione dell'applicazione e del mercato

La valutazione del volume di accumulo prevede in primo luogo la determinazione del calore totale (Q_t) necessario per riscaldare l'acqua richiesta nel periodo di punta, moltiplicando la capacità termica (C) per il salto termico che sussiste fra la temperatura di utilizzo (t_u) dell'acqua calda e la temperatura di alimentazione dell'acqua fredda (t_f):

$$Q_t = C (t_u - t_f) \quad (\text{IV.52})$$

In seguito, si stima il calore orario (Q_h) che deve essere ceduto all'acqua in base al calore totale richiesto e al tempo in cui esso può essere ceduto,

cioè in base al tempo dato dalla somma fra il periodo di preriscaldamento (t_{pr}) e il periodo di punta (t_{pu}):

$$Q_h = \frac{Q_t}{(t_{pr} + t_{pu})} \quad (IV.53)$$

Si determina, poi, il calore da accumulare (Q_a) nella fase di preriscaldamento:

$$Q_a = Q_h t_{pr} \quad (IV.54)$$

Il volume (V_b) del preparatore d'acqua calda è funzione del calore da accumulare e della differenza fra la temperatura dell'acqua di accumulo (t_a) e la temperatura dell'acqua fredda (t_f):

$$V_b = \frac{Q_a}{(t_a - t_f)} \quad (IV.55)$$

Il volume del preparatore d'acqua (bollitore) deve essere circa il 20% del volume complessivo (puffer V_p), calcolato in base all'energia termica massima producibile per metro quadro di CPV/T:

$$E_{max} = \frac{A \cdot v \cdot 3600 \cdot c \cdot n \cdot (t_p - t_r)}{A_{cpv} / t} \quad (IV.56)$$

Dove v è la velocità del fluido, A è l'area della sezione del tubo, c è il calore specifico del fluido, T_p è la temperatura media di produzione dell'acqua calda e T_r è la temperatura del fluido di ritorno al sistema.

Il volume del puffer sarà:

$$V_p = \frac{E_{max}}{\rho \cdot c \cdot (t_p - t_f)} \cdot A_{cpv} / t \quad (IV.57)$$

Infine sarà necessario calcolare l'area del serpentino necessario al riscaldamento dell'acqua. Essa viene valutata come:

$$S = \frac{Q_h}{K \cdot (t_{ms} - t_m)} \quad (IV.58)$$

Dove t_{ms} è la temperatura media del fluido scaldante, dato dalla media fra la temperatura di mandata e di ritorno del fluido scaldante. Invece, t_m è la temperatura media del fluido riscaldato, dato dalla media fra la temperatura dell'acqua di accumulo (t_a) e la temperatura dell'acqua fredda (t_f) di alimentazione.

Dimensionato il serbatoio, considerando la stratificazione, si può far riferimento ad un modello "*Multinode*" per valutare come evolve la temperatura all'interno del serbatoio.

Tale modello suddivide il fluido contenuto all'interno del serbatoio in tanti pacchetti i quali hanno la propria temperatura ed interagiscono con i pacchetti più prossimi. Nel modello perfettamente stratificato il serbatoio

Capitolo 4

viene suddiviso in un numero N di strati a temperatura uniforme e si assume che il flusso dal sistema CPV/T raggiunga il nodo a temperatura più vicina, ma inferiore a quella di uscita.

Nel modello con vari strati i , il bilancio al nodo i -esimo risulta:

$$\begin{aligned} \dot{m}_i c \frac{dT_i}{dt} = & \frac{k}{\Delta x_{i+1 \rightarrow i}} A_{c,i} (T_{i+1} - T_i) + \frac{k}{\Delta x_{i-1 \rightarrow i}} A_{c,i} (T_{i-1} - T_i) + \\ & \dot{m}_{\text{down}} c (T_{i-1} - T_i) + \dot{m}_{\text{up}} c (T_{i+1} - T_i) + U_{\text{tank}} A_{s,i} (T_{\text{amb}} - T_i) + \\ & \dot{m}_{1\text{in}} c (T_{1\text{in}}) - \dot{m}_{1\text{out}} c (T_i) + \dot{m}_{2\text{in}} c_p (T_{2\text{in}}) - \dot{m}_{2\text{out}} c (T_i) \end{aligned} \quad (\text{IV.59})$$

Questo bilancio viene risolto su tutti i nodi del serbatoio per trovare la temperatura all'istante considerato (T_i) di ciascuno di essi. I pedici 1 e 2 collegati alle portate si riferiscono all'ingresso/uscita 1 o 2 nel/dal serbatoio, l'area A cui sono riferiti i termini di conduzione (k è la conducibilità termica) è quella della sezione trasversale del serbatoio, mentre quella cui è riferito il termine di convezione verso l'esterno (il quale è indicato con U_{tank}) è quella della superficie esterna del serbatoio pertinente al nodo in esame. Le portate coi pedici up e down sono quelle che fluiscono verso l'alto o verso il basso all'interno del serbatoio in base al bilancio di massa.

Implementando le equazioni è possibile, note la temperatura del fluido che arriva dal CPV/T (calcolate con il modello termico generale) e le temperature richieste dall'utenza, determinare l'andamento della temperatura del fluido contenuto all'interno del serbatoio riuscendo anche a comprendere il comportamento dei diversi livelli termici presi in considerazione.

4.9.3. Modello di scelta

La definizione del sistema CPV/T dipende, in ultima analisi, dalla tipologia di utenza da servire. Sostanzialmente, le principali variabili che influenzano la scelta del sistema a concentrazione sono:

- soddisfacimento delle richieste energetiche;
- disponibilità di spazio per l'installazione dell'impianto;
- costi da sostenere.

In questo senso, si può far riferimento ad un modello di scelta, come riportato in Figura IV.27, in cui la valutazione delle prestazioni del sistema CPV/T è condizionata dalle esigenze dell'utenza (Renno e Petito, 2015).

In generale, si parte con una prima ipotesi di impianto in termini di concentrazione, ottica, configurazione e numero di celle. Qualora tale definizione soddisfi le richieste, in termini di fabbisogni energetici, spazio e costi, si procede con la valutazione dell'impianto. In caso contrario, si modificano i vari parametri fino a raggiungere la soluzione desiderata. La

fase modellistica del sistema si conclude con tale passaggio; possiamo brevemente formulare un modello di costi generale per un sistema CPV/T, che chiaramente va analizzato, di volta in volta, per una specifica configurazione.

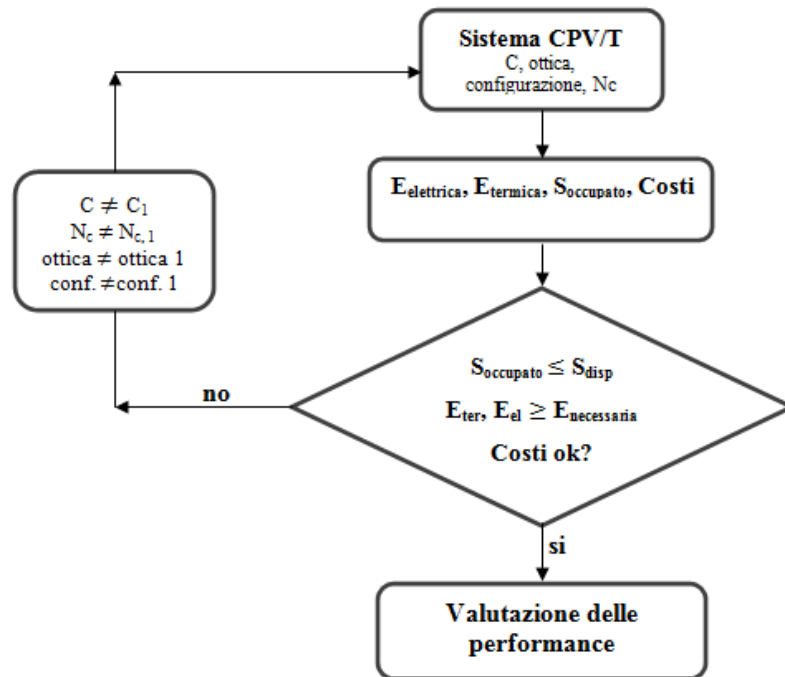


Figura IV.27 Modello di scelta

4.9.3.1. Modello di costo

Nella valutazione del sistema a concentrazione risulta importante, la definizione dei costi di impianto. Nello specifico, il modello di scelta permette di valutare i costi del CPV/T in funzione della configurazione scelta. Considerando una parametrizzazione iniziale dei costi, le spese operative per il funzionamento dell'impianto non sono considerate ed il costo complessivo dell'impianto può essere definito come (Renno et al., 2016 b):

$$C_{\text{impianto}} = C_{\text{moduli}} + C_{\text{inseguitore}} + C_{\text{inverter}} + C_{\text{AHP}} + C_{\text{serbatoio}} \quad (\text{IV.60})$$

Dove, nella formulazione più generale si considerano i costi per il sistema di inseguimento, per l'inverter e per l'eventuale serbatoio di accumulo. Nell'equazione IV.60, con il termine C_{AHP} , si vuole considerare anche

Capitolo 4

l'eventuale scelta di una macchina ad assorbimento per il soddisfacimento delle richieste frigorifere.

Il costo dei moduli dipende dal numero degli stessi e dalla taglia del sistema. In generale, il costo di un modulo può essere espresso come:

$$C_{\text{modulo}} = C_{\text{celle}} + C_{\text{ottica}} + C_{\text{componenti aggiuntivi}} \quad (\text{IV.61})$$

Dove per componenti aggiuntivi si intende sia la parte di cavi che il sistema di raffreddamento.

Partendo dalla definizione iniziale dei costi del sistema e considerando la produzione energetica sia in termini elettrici che termici, si può considerare un'analisi in termini di simple pay – back (SPB), valutando i flussi di cassa (CF) dell'impianto:

$$\text{SPB} = \frac{C_{\text{impianto}}}{\text{CF}} \quad (\text{IV.62})$$

Dove i flussi di cassa annuali tengono conto dell'energia risparmiata, ovvero l'energia sia termica che elettrica non acquistata tradizionalmente:

$$\text{CF} = R_{\text{el}} + R_{\text{ter}} \quad (\text{IV.63})$$

L'energia risparmiata (R) sia elettrica che termica, può essere calcolata considerando l'energia prodotta ed i costi specifici di acquisto in (€/kWh):

$$R_{\text{el}} = E_{\text{el}} \cdot c_{\text{ee}} \quad (\text{IV.64})$$

$$R_{\text{ter}} = E_{\text{ter}} \cdot c_{\text{et}} \quad (\text{IV.65})$$

In questo modo, si possono valorizzare i proventi dell'impianto ed analizzarne la convenienza. Nel Capitolo 6, in base a specifici esempi, verrà valutata la convenienza economica di un sistema CPV/T.

4.9.4. Analisi aggiuntive per un impianto a concentrazione

Un'ultima fase modellistica da valutare riguarda alcuni aspetti legati ad analisi specifiche inerenti il sistema CPV/T quali:

- la necessità di manutenzione di un impianto CPV/T;
- l'impatto ambientale.

Nel primo caso, chiaramente dipendente dal tipo di sistema scelto, si vuole evidenziare che, qualsiasi tipo di impianto necessita di manutenzione. Tale aspetto va valutato in quanto porta a cali di producibilità del sistema ed aumento dei costi (Renno et al., 2016 b). Il secondo aspetto, invece,

sottolinea il risparmio nelle emissioni di CO₂, impiegando un sistema rinnovabile come quello a concentrazione.

4.9.4.1. Analisi di manutenzione

Lo studio della manutenzione, prescindendo dallo specifico impianto, si può generalizzare tramite un'analisi di inefficienza che sfrutta la tecnica FMECA (Carmignani, 2009). Essa, una volta riconosciute le cause specifiche di rottura dell'impianto (da considerarsi caso per caso), permette di valutare l'inefficienza globale del sistema valutando la frequenza delle rotture per ogni componente (Ben-Daya e Raouf, 1996).

La valutazione delle inefficienze del sistema è ottenuta stimando il tempo di non funzionamento dell'impianto (t_{nf}) a causa delle fermate per eventuali rotture. Pertanto, la reale producibilità termica ed elettrica del sistema CPV/T dipende dalla mancata produzione durante il tempo di non funzionamento. L'energia elettrica (termica) realmente prodotta dall'impianto, quindi, è uguale a:

$$E_{el(ter) reale} = E_{el(ter)} - E_{el(ter) persa} \quad (IV.66)$$

Dove l'energia persa è dovuta alle fermate per le rotture di ciascun componente da 1 a k:

$$E_{el(ter) persa} = \sum_{i=1}^k E_{el(ter) persa, i} \quad (IV.67)$$

Per la stima dell'energia non prodotta a causa di ciascun i-esimo componente, bisogna considerare il suo tempo di non funzionamento ($t_{nf,i}$):

$$E_{el(ter) persa, i} = t_{nf,i} \cdot \frac{E_{el(ter) giornaliera}}{h_{funz, giornaliera}} \cdot e_{el(ter) i} \quad (IV.68)$$

Dove $E_{el(ter) giornaliera}$ è l'energia media, elettrica o termica, in un giorno ottenuta dal sistema, $h_{funz, giornaliera}$ sono le ore medie di funzionamento mentre $e_{el(ter), i}$ rappresenta l'effetto delle perdite. In particolare, esso misura l'impatto delle rotture sulla produzione energetica; nello specifico è uguale alla percentuale di energia persa a causa dei malfunzionamenti di ogni componente. Il tempo di non funzionamento dell'i-esimo componente può essere valutato come (Renno et al., 2016 b):

$$t_{nf,i} = (1 - Eff_i) \cdot t_{tot} \quad (IV.69)$$

dove t_{tot} rappresenta il tempo totale in un anno, in cui si ha produzione energetica. Con Eff_i è indicata l'efficienza dell'i-esimo componente calcolata come:

$$Eff_i = \frac{MTBF_i}{MTBF_i + MTTR_i} \quad (IV.70)$$

Capitolo 4

Dove con $MTBF_i$ e $MTTR_i$ sono indicati rispettivamente il tempo medio tra due rotture consecutive su un componente (Mean Time Between Failures) ed il tempo medio per la riparazione dello stesso (Mean Time To Repair).

Tali tempi sono valutabili, caso per caso, attraverso un'analisi storica dei dati inerenti la frequenza di rottura ed il tempo per riparare ciascun componente.

L'analisi di manutenzione è importante quando si è definito l'impianto poiché permette di valutare l'energia effettivamente producibile e di analizzare i costi dovuti al funzionamento dell'impianto.

Considerando il modello di costo al paragrafo precedente, tale analisi porta a modificare i flussi di cassa (CF) dell'equazione IV.63. Infatti, vanno tenuti in considerazione le reali producibilità termiche ed elettriche del sistema, come osservato nell'equazione IV.66. Inoltre, aumentano i costi di impianto. In questo senso, il costo totale sarà dato dai costi di impianto dell'equazione IV.60, più i costi di manutenzione:

$$C_{\text{totale}} = C_{\text{impianto}} + C_{\text{manutenzione}} \quad (\text{IV.71})$$

Dove i costi di manutenzione sono pari a (Renno et al., 2016 b):

$$C_{\text{manutenzione}} = C_{\text{in}} + C_{\text{mdo}} + C_{\text{sost}} \quad (\text{IV.72})$$

Con C_{mdo} e C_{sost} sono indicati rispettivamente i costi di manodopera e di sostituzione del componente, mentre C_{in} indicano i costi di inefficienza, valutati come energia elettrica e termica non prodotta per il costo unitario di acquisto.

$$C_{\text{in}} = C_{\text{in,el}} + C_{\text{in,ter}} \quad (\text{IV.73})$$

Con:

$$C_{\text{in,el (ter)}} = E_{\text{el (ter),persa}} \cdot C_{\text{ee (et)}} \quad (\text{IV.74})$$

In questo modo può essere completata in maniera specifica l'analisi economica e valutare realmente il SPB dell'impianto.

Nel capitolo 6, facendo riferimento ad uno specifico impianto, si mostrerà un'analisi economica che tiene conto anche della manutenzione.

4.9.4.2. *Impatto ambientale*

Le prestazioni di un sistema a concentrazione possono essere infine valutate anche da un punto di vista dell'impatto ambientale. In questo senso, ci si riferisce principalmente al risparmio di energia primaria che si traduce in emissioni di CO_2 evitate.

Infine, si può ragionare anche in termini di analisi del ciclo vita del sistema (LCA). In questo caso, definito l'impianto, in tutte le sue

caratteristiche, si possono osservare alcuni indicatori di impatto ambientale (De Feo et al., 2016).

In termini di energia primaria, il sistema CPV/T può essere valutato stimando il coefficiente di utilizzo del combustibile (CUC) (Renno e Petito, 2015):

$$CUC = \frac{E_{el} + E_{ter} + E_{fr}}{\frac{E_{el}}{\eta_{el-in}} + \frac{E_{ter}}{\eta_b} + \frac{E_{fr}}{\eta_{el-in} \cdot COP}} \quad (IV.75)$$

Tale coefficiente permette il confronto rispetto ad un sistema tradizionale che produce la stessa energia, elettrica, termica e frigorifera. Nello specifico, si considera con η_{el-in} il rendimento elettrico della rete tradizionale, con η_c il rendimento termico di una caldaia e considerando di fornire la componente frigorifera tramite una pompa di calore elettrica, si indica il COP di tale dispositivo (Aprea e Renno, 2002).

I risparmi di energia elettrica, termica e frigorifera, sono valutati considerando la differenza tra l'energia prodotta e le richieste di una specifica utenza, ipotizzando una certa vita utile.

Pertanto, l'impiego del sistema a concentrazione permette di ridurre le emissioni di CO₂ (Abolarin et al., 2013), in confronto con un sistema tradizionale che soddisfi gli stessi carichi (Aprea et al., 2004). Le emissioni evitate dal sistema CPV/T sono collegate all'energia primaria (elettrica, termica e frigorifera) risparmiata (Renno e Petito, 2015):

$$kg \text{ CO}_2 \text{ evitate} = \frac{(E_{el,risp} + E_{ter,risp} + E_{fr,risp}) \cdot 3600}{PCI} \cdot \frac{1}{1.056} \cdot 1.94 \quad (IV.76)$$

Dove con PCI si intende il potere calorifico inferiore del combustibile impiegato. Tale formulazione permette di valutare le emissioni di CO₂ evitate annualmente.

Nel capitolo 6, in funzione di specifici carichi, sarà riportato un esempio di emissioni evitate.

4.10. Conclusione sui modelli

Le fasi di modellazione presentate nel Capitolo 3 e nel Capitolo 4, permettono l'analisi dei sistemi a concentrazione. Tutti gli strumenti studiati consentono di valutare qualsiasi tipo di impianto. Pertanto i risultati per una specifica applicazione dipendono dalle scelte fatte in sede di definizione.

Come detto in precedenza, parte dei modelli necessita, soprattutto volendosi riferire a determinate configurazioni, di una parte di analisi sperimentale. In questo senso, nel Capitolo 5 verranno presentati i modelli sperimentali elaborati, con attenzione agli impianti realizzati. Infine, nel Capitolo 6, si osserveranno i risultati di tutta la modellazione teorico – sperimentale adottata.

Capitolo 5: Analisi Sperimentale per la definizione e modellazione dei sistemi a concentrazione

5.1. Introduzione

L'analisi sperimentale descritta nel presente Capitolo rappresenta un supporto fondamentale sia alla fase di modellazione dei sistemi a concentrazione sia alla valutazione dei risultati. Infatti, tale analisi è fondamentale per i modelli alle reti neurali, per la definizione dei modelli elettrici e termici e per l'analisi teorico – sperimentale della temperatura della cella. Inoltre, essa consente la caratterizzazione delle celle solari e la definizione del fattore di concentrazione. Infine permette di costruire gran parte del database, necessario per l'addestramento, validazione e testing di differenti modelli.

In termini di risultati, essa permette la validazione dei risultati teorici e, l'eventuale analisi dello scostamento dei valori previsti rispetto a quelli misurati in campo. All'interno dell'analisi sperimentale trova spazio anche la progettazione degli impianti. Difatti, tale fase, non solo vuole allestire una stazione di misura per le prove necessarie alla modellazione teorica, ma costituisce il punto di partenza per la realizzazione degli impianti studiati.

L'analisi sperimentale quindi incide su:

1. Modelli alle reti neurali per la stima della radiazione globale e diretta;
2. Modello di Random Forest per la definizione della temperatura della cella;
3. Caratterizzazione della cella multi – giunzione;
4. Fattore di concentrazione;
5. Modello elettrico della cella;
6. Modello termico degli impianti;

7. Analisi delle ottiche;
8. Analisi della producibilità elettrica;
9. Analisi della configurazione del sistema;
10. Realizzazione definitiva degli impianti.

In particolare, i modelli alle reti neurali necessitano di una campagna di prove sperimentali sia per la fase di raccolta dei dati, fondamentale per l'inizializzazione dei modelli e la scelta degli input, sia per la fase di verifica dei modelli elaborati. Allo stesso modo, il modello di Random Forest necessita di dati sperimentali riferiti agli input definiti ed alla temperatura della cella, sia per la fase di addestramento del modello, sia per la sua definitiva validazione. In termini di cella multi – giunzione, un'attenta analisi sperimentali ha influenza sia sulla caratterizzazione della stessa, sia sul suo funzionamento. In questo senso l'analisi, in primo luogo, vuole evidenziare le caratteristiche reali delle celle, valutando la curva corrente – tensione ($I - V$); in secondo luogo, permette l'analisi della producibilità della stessa, confrontando i risultati con i modelli elettrici teorici elaborati.

Dal punto di vista termico, invece, lo studio presente in questo capitolo, ha incidenza nell'evidenziare le temperature sperimentali della cella utili ai modelli, nonché le caratteristiche di irraggiamento e temperatura ambiente, ancora una volta coinvolte nella fase di modellazione termica sia stazionaria che transitoria. La concentrazione, l'analisi delle ottiche e la configurazione, invece, rientrano nella fase di progettazione ed allestimento degli impianti. In questo senso, si può valutare sperimentalmente come tali fattori abbiano influenza sul sistema al fine di evidenziare le peculiarità degli impianti a concentrazione. In questo senso, partendo da un primo progetto ed allestimento sperimentale di tipo point – focus, si arriva ad un impianto line – focus. Pertanto, si possono evidenziare due aspetti chiave della fase sperimentale:

1. La realizzazione di prototipi a concentrazione;
2. L'allestimento di una stazione di misura.

Tali fasi sono, chiaramente, intrecciate tra loro in quanto solo dopo la progettazione e l'allestimento di un primo impianto è stato possibile definire ed installare i sensori necessari. Tuttavia allo stesso tempo, solo tramite le misure effettuate si è potuto caratterizzare l'impianto nei suoi componenti e valutare le prestazioni attraverso i modelli teorico – sperimentali. Quest'ultimo aspetto ha condotto, infine, alla valutazione di nuovi prototipi sperimentali. Pertanto, le principali fasi in cui si è divisa l'attività sperimentale sono:

- Progettazione ed allestimento di un primo prototipo;
- Definizione dei sensori da utilizzare;

Capitolo 5

- Configurazione del sistema integrato di misura;
- Varie campagne di misurazioni;
- Caratterizzazione della cella e funzionamento impianto;
- Progettazione di un secondo prototipo.

Le fasi, come detto, non sono necessariamente successive, ad esempio, le campagne di misura hanno riguardato vari periodi, al fine di monitorare molteplici variabili esterne e parametri di funzionamento dell'impianto.

5.2. Progettazione di un primo prototipo sperimentale

La prima fase di analisi sperimentale riguarda la progettazione e l'allestimento di un impianto a concentrazione adottando uno schema quanto più semplice possibile. In questo senso, infatti, l'obiettivo è quello di uno studio preliminare del comportamento della cella multi – giunzione in concentrazione, pertanto, si cerca di rendere il sistema quanto più flessibile possibile e di semplice realizzazione.

La scelta è ricaduta su una configurazione di tipo point – focus con ottica rifrattiva. Nello specifico, l'ottica scelta è costituita da una lente di Fresnel. In questo modo il sistema è facilmente configurabile e non si necessita di un'analisi preliminare delle dimensioni dell'ottica per l'installazione. Infatti, basta posizionare correttamente la cella al di sotto dell'ottica rifrattiva per concentrare la luce. L'utilizzo di un'ottica rifrattiva tuttavia, come riportato nei capitoli precedenti, richiede la presenza di un elemento ottico secondario al fine di evitare problemi di aberrazione cromatica. Lo schema più essenziale possibile dell'impianto, quindi, deve prevedere il tipo di configurazione, l'ottica e la cella. Avendo definito tali parametri, la struttura preliminare dell'impianto progettato, come mostrato in Figura V.1, permette:

- La disposizione delle celle con ottica dedicata;
- Una struttura di supporto per l'ottica;
- Un supporto per la cella;
- Un supporto per l'installazione della strumentazione di misura.

L'ultimo aspetto chiave che, anche in un primo tentativo di realizzazione di un prototipo per un impianto a concentrazione, non può mancare, riguarda la definizione dei gradi di libertà dell'impianto. In questo senso, si intendono i possibili movimenti che il sistema può compiere per:

- Inseguire il Sole nel suo moto apparente;
- Avere flessibilità nel riconfigurare l'impianto partendo dalle impostazioni iniziali.

In merito all'inseguimento, sicuramente il sistema deve poter ruotare intorno all'asse Est – Ovest per seguire il Sole nel suo moto durante la giornata. Inoltre, si deve prevedere una seconda movimentazione, di tipo Nord – Sud, principalmente legata alla stagionalità.

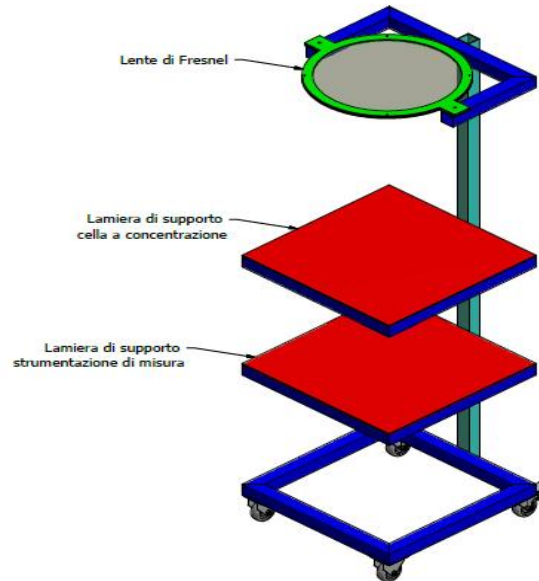


Figura V.1 Progetto preliminare del primo prototipo

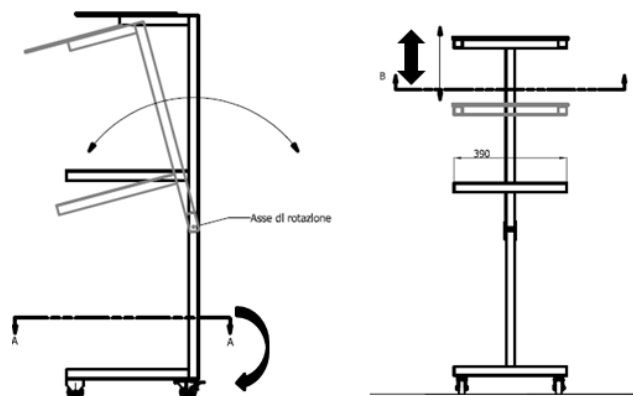


Figura V.2 Gradi di libertà della struttura

La necessità di poter riconfigurare il sistema, richiede la definizione di un ulteriore grado di libertà, legato alla possibilità di muovere l'ottica primaria, costituita dalla lente al fine di modulare la concentrazione. In Figura V.2

Capitolo 5

sono schematizzati i gradi di libertà della struttura. In Figura V.3, sono riportate le dimensioni della struttura realizzata.

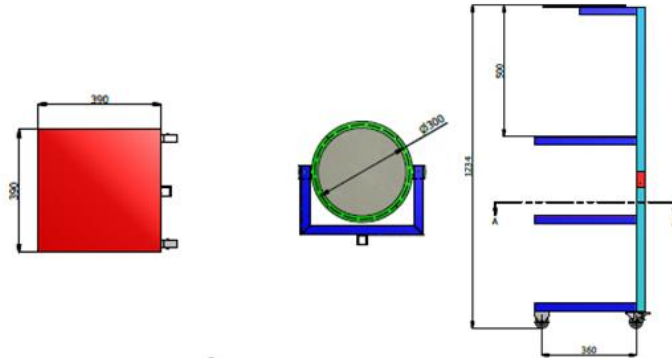


Figura V.3 Dimensioni da progetto del sistema

Il sistema così progettato, è stato realizzato ed allestito presso il Laboratorio di Termodinamica Applicata dell'Università di Salerno.

5.3. Realizzazione ed allestimento del prototipo sperimentale

L'impianto progettato, seppur in una schematizzazione essenziale, riproduce a pieno le funzionalità di un sistema a concentrazione. In Figura V.4 si può osservare l'impianto costruito, in base alle precedenti specifiche.



Figura V.4 Il prototipo costruito all'Università di Salerno

Il sistema point – focus realizzato nel suo insieme è composto da:

- un'ottica primaria;
- un'ottica secondaria;
- una cella multi – giunzione;
- vari gradi di libertà per l'inseguimento;
- un apparato di misura.

Tale prototipo consente di caratterizzare la cella multi – giunzione la valutazione della producibilità di un sistema a concentrazione. Inoltre, la presenza di un apparato specifico di misura consente la definizione di varie campagne di prove sperimentale al fine di supportare tutte le fasi di modellazione teorica.

In questa fase, osserviamo in dettaglio i vari componenti strutturali dell'impianto, mentre in un secondo momento analizzeremo la strumentazione di misura. Va precisato che a seconda di come i componenti sono installati, è possibile definire varie configurazione di impianto al fine di valutare separatamente le prestazioni e consentire una caratterizzazione più precisa della cella solare.

5.3.1. Le ottiche installate

L'impianto realizzato prevede, nella parte superiore del sistema, la presenza di una lente di Fresnel che costituisce l'ottica primaria. Nello specifico, posizionando la lente al di sopra della cella solare si consente la concentrazione della luce per rifrazione. La lente di Fresnel, costituita da materiale acrilico, presenta un diametro di circa 30 cm ed uno spessore di circa 1 cm. In Figura V.5 è riportata la lente installata.

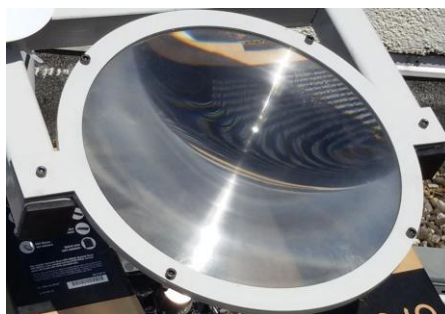


Figura V.5 La lente di Fresnel installata

Si può osservare come l'alloggio della lente avvenga attraverso una struttura appositamente progettata.

Il sistema ottico prevede, inoltre la presenza di un caleidoscopio che funge da elemento secondario. Tale dispositivo è montato direttamente sulla

Capitolo 5

cella multi – giunzione ed ha la funzione di uniformare la radiazione diretta incidente ed evitare il fenomeno dell'aberrazione cromatica, tipo di ottiche rifrattive. In Figura V.6 è riportato l'elemento secondario dell'ottica.

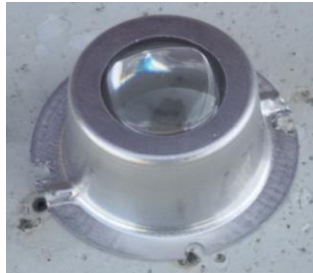


Figura V.6 Ottica secondaria costituita da un caleidoscopio

La composizione dell'ottica, con un elemento primario ed uno secondario, incide sul fattore di concentrazione dell'impianto. Inoltre, la possibilità di modulare l'altezza della lente, quindi la distanza focale, porta all'introduzione di una variabile aggiuntiva. Pertanto, la corretta valutazione del fattore di concentrazione, in questo caso, può essere ottenuta solo sperimentalmente, come vedremo in seguito. Inoltre, la possibilità di modificare l'altezza della lente, porta sperimentalmente a differenti parametri in sede di caratterizzazione della cella. Pertanto, la flessibilità dell'ottica installata permette di modificare il fattore di concentrazione.

5.3.2. La cella a tripla giunzione dell'impianto

L'apparato sperimentale realizzato prevede inizialmente la presenza di un'unica cella a tripla giunzione, montata su uno specifico supporto, posizionata al centro sotto lente. La cella multi – giunzione, principalmente impiegata presenta dimensioni di $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$. La cella, come vedremo anche con l'analisi di elettroluminescenza, presenta tre layer:

- Fosfuro di Indio Gallio (InGaP) come top cella;
- Arseniuro di Gallio (GaAs) come cella intermedia;
- Germanio (Ge) come substrato.

Tali celle presentano un'ampia risposta spettrale, come riportato in Figura V.7, dove sono indicati di targa, relativi all'efficienza quantica, forniti dal costruttore. Ogni giunzione è caratterizzata da una diversa energia di interbanda e quindi risulta sensibile a un particolare intervallo di lunghezze d'onda della luce. Lo strato superiore della cella (InGaP) assorbe la luce con lunghezza d'onda tra circa 300nm e 650 nm lasciando passare la luce a cui sono sensibili le altre due giunzioni. La giunzione centrale (GaAs) assorbe la luce con lunghezza d'onda tra 600 nm e 890 nm, circa, e lascia

passare quella con lunghezza d'onda nell'intervallo tra 850 nm e 1800 nm, la quale viene assorbita dalla giunzione in Germanio. Risulta, quindi, evidente l'efficacia nel coprire il più ampio spettro di frequenze possibile.

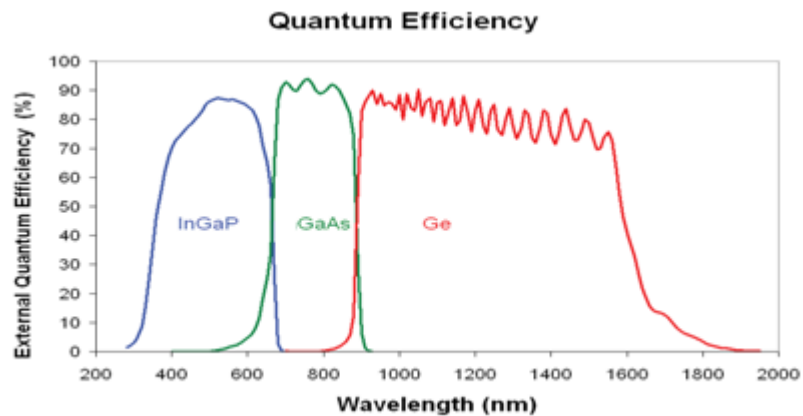


Figura V.7 Efficienza quantica delle giunzioni in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente

Nel prototipo del sistema a concentrazione la cella è collegata, inizialmente, ad una resistenza elettrica che simula il carico, come riportato in Figura V.8.

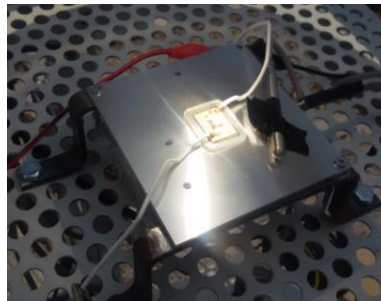


Figura V.8 Cella a tripla giunzione impiegata

In particolar modo, al fine di effettuare varie prove, in un primo momento, la resistenza è stata variata durante il funzionamento, in base ai valori ottimali ottenuti in fase di caratterizzazione. In un secondo momento, è stato imposto un carico variabile attraverso un apposito dispositivo, al fine di mantenere il punto di massima potenza.

Come cella multi – giunzione è stata anche adoperata una cella a tripla giunzione di tipo InGaP/InGaAs/Ge delle dimensioni di 1 cm^2 . Avendo precise informazioni sulla sua caratterizzazione (Emcore, 2012), come riportato in Tabella V.1, essa è stata impiegata unicamente per alcune misure di producibilità.

Tabella V.1 Valori di targa della cella da 1cm^2

Parametri	Valore a $25\text{ }^\circ\text{C}$, 50 W/cm^2
η	39,6
I_{sc} (A)	6,48
I_{mp} (A)	6,34
V_{oc} (V)	3,19
V_{mp} (V)	2,76

5.3.3. Le modalità di inseguimento

Il prototipo a concentrazione sviluppato, come detto, permette tutte le movimentazioni al fine di inseguire il moto apparente del Sole. In particolare, sia che si adoperi un sistema manuale sia che si adotti una configurazione automatica, i riferimenti principali per il corretto posizionamento sono forniti dalla tensione monitorata e dal cono di luce registrato sul caleidoscopio tramite una fotocellula. Quando il cono di luce non risulta perfettamente in asse con l'ottica secondaria il sistema viene movimentato in modo tale da migliorare la concentrazione. A tale asimmetria corrisponde un calo della tensione.



Figura V.9 Goniometro per l'inclinazione Nord – Sud e sistema inclinato

Il sistema presenta, come visto, tre gradi di libertà. Lo spostamento orizzontale è garantito dalla presenza di un supporto mobile alla base della struttura. La lente di Fresnel può essere movimentata in senso verticale al

fine di migliorare la focalizzazione e variare la concentrazione. Infine, è possibile inclinare la lente, contemporaneamente al piano su cui è posizionata la cella con l'ottica secondaria, fino ad un massimo di 55° , soprattutto per garantire l'inseguimento lungo l'asse Nord – Sud. A tal fine, un goniometro, posto sotto il piano della cella, permette di controllare l'inclinazione, come mostrato in Figura V.9.

In Figura V.9 è possibile, inoltre, osservare il sistema inclinato durante il suo funzionamento giornaliero.

5.3.4. Le configurazioni per l'analisi sperimentale

In Figura V.10 sono riportate le varie configurazioni del prototipo realizzato.

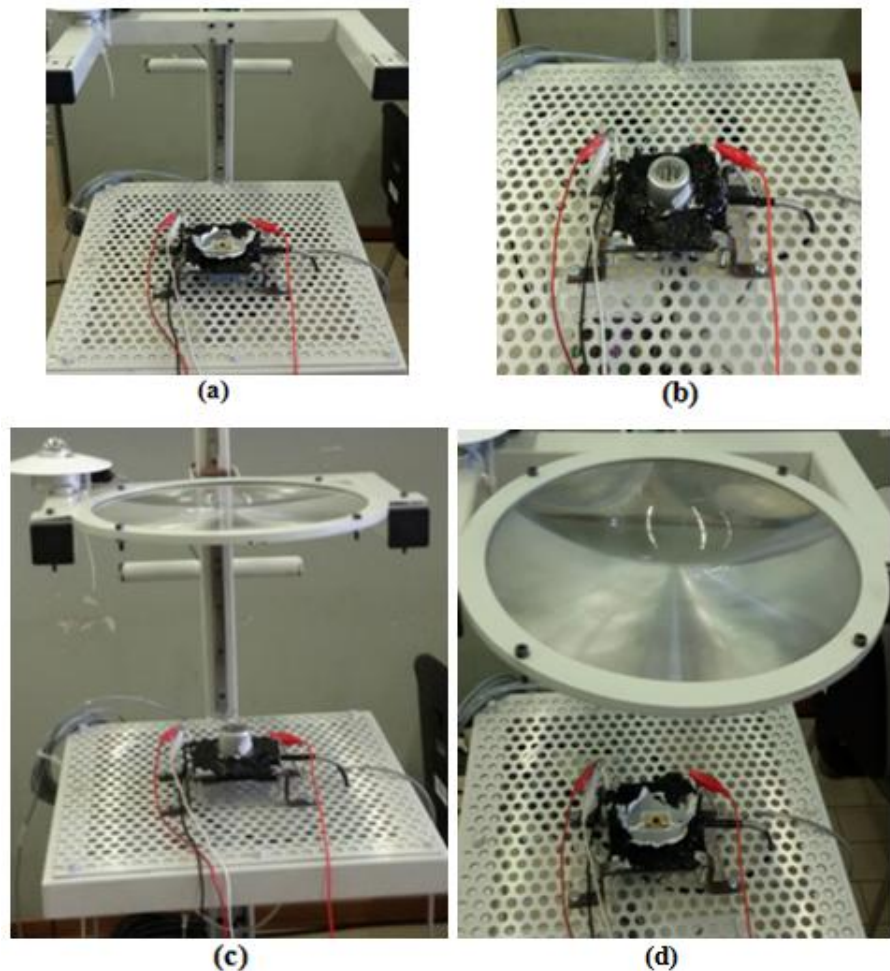


Figura V.10 Le configurazioni del prototipo per lo studio sperimentale

Capitolo 5

Nella configurazione 1 si analizza il comportamento della cella non in concentrazione, pertanto nessuna ottica viene considerata. In questo caso, la concentrazione assume valore unitario. Nella configurazione 2, si studia l'impatto del caleidoscopio, configurando un sistema a bassa concentrazione, il cui valore è incognito. La configurazione 3 prevede la presenza di entrambe le ottiche. Tale disposizione costituisce quella fondamentale per lo studio del sistema a concentrazione, infatti rappresenta la configurazione da impiegare, principalmente, per il funzionamento del sistema. L'ultima configurazione è più marginale in quanto analizza la sola presenza dell'ottica primaria, la quale lavora poco efficientemente, come vedremo, per problemi legati all'inseguimento.

Le prime tre configurazioni sono fondamentali per la caratterizzazione della cella ed entrano in gioco nella procedura sperimentale per la valutazione del fattore di concentrazione.

5.4. L'apparato di misura sperimentale

La strumentazione per la misura è fondamentale al fine di rilevare il funzionamento degli impianti, le caratteristiche dei componenti ed acquisire i dati di supporto per i modelli teorico – sperimentali. Nello specifico, l'apparato di misura è costituito da:

- Sensori per la misura della temperatura;
- Sensori per la valutazione della radiazione;
- Sistema di acquisizione dei dati sul campo e la misura diretta di differenti parametri.

Le principali misure di temperatura riguardano la temperatura ambiente e quella della cella. Nello specifico, quest'ultima temperatura viene monitorata con l'impiego di vari sensori. I dati di temperatura raccolti durante differenti campagne sperimentali sono utilizzati per l'implementazione delle reti neurali in tutte le sue fasi, dall'input ai test, per la realizzazione del modello Random Forest e per l'impiego dei modelli termici transitori definiti.

La misura della radiazione solare interessa sia la parte globale che la sua componente diretta. Tali dati sono raccolti sia al fine di implementare le reti neurali, sia per caratterizzare il comportamento della cella che per valutare la producibilità dell'impianto.

Il sistema di acquisizione dei dati, oltre a permettere il campionamento e la memorizzazione delle misure ottenute con sensori esterni, funge anch'esso da misuratore per alcune grandezze quali, tensione e corrente della cella, resistenza elettrica. In particolare per la misura della corrente e delle resistenza elettrica è stato utilizzato anche un dispositivo aggiuntivo, ovvero il tester FLUKE 233. Tale dispositivo, tra le tante misure, consente la valutazione di corrente continua e diretta fino a 20 Ampere e della resistenza

elettrica in un intervallo tra 0.1 Ω e 10 k Ω . In Figura V.11a è mostrato il sistema sperimentale con l'apparato di misura, mentre in Figura V.11b si può osservare il tester indicato.

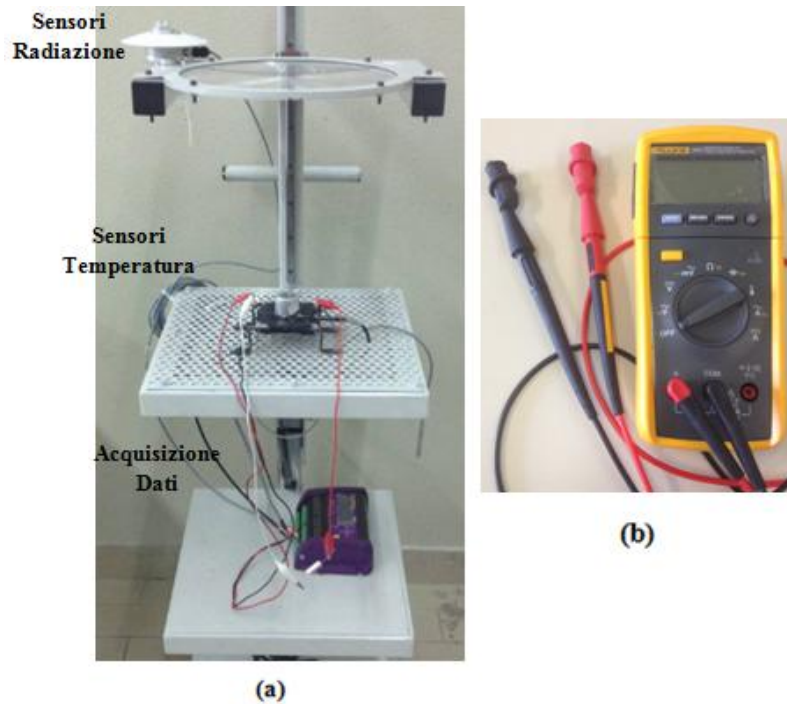


Figura V.11 (a) apparato di misura; (b) il tester FLUKE 233

5.4.1. I sensori di temperatura

I sensori di temperatura utilizzati sono termo – resistenze, note anche come RTD (*Resistance Temperature Detector*), ovvero sensori termometrici basati sulla variazione di resistenza di un metallo in funzione della temperatura. Ogni metallo ha una resistività specifica (ρ) che varia con la temperatura secondo la relazione:

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3] \quad (V.1)$$

dove α , β e γ sono parametri determinati sperimentalmente, mentre ρ_0 è la resistività alla temperatura di riferimento T_0 (di solito 0°C).

Le termo – resistenze utilizzate nel sistema a concentrazione sono del tipo Pt100, ovvero termo – resistenze in platino la cui resistenza alla temperatura di 0°C è pari a 100 Ω . Nello specifico, come indicato in Figura V.12, sono impiegati tre sensori di temperatura:

Capitolo 5

- Sopra cella per la T superiore;
- Sotto cella per la T inferiore;
- Libero per la T ambiente

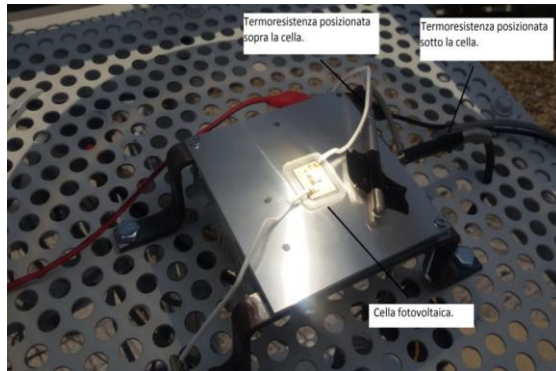


Figura V.12 Termo – resistenze PT100 installate

Le termo – resistenze sono costituite da un elemento sensibile, protetto da una guaina, il quale costituisce la parte più importante del sensore. Tali dispositivi sono collegati al sistema di acquisizione (DataLogger) tramite una connessione a due, tre o quattro fili, per la valutazione fisica del segnale.

Tutte le termo – resistenze impiegate hanno classe di precisione A ($\pm 0.15 + 0.002 \cdot |T|$), dove $|T|$ è la misura della temperatura in °C.

5.4.2. Sensori per la valutazione della radiazione

La misura della radiazione globale viene ottenuta attraverso l'impiego di un piranometro. In particolare, lo strumento utilizzato LP PYRA 03, mostrato in Figura V.13a, rientra tra i piranometri a termopila. Tali dispositivi, sono dotati di un sensore, la termopila, che permette di trasformare l'energia termica in differenza di potenziale.

La superficie sensibile della termopila è coperta con vernice nera opaca che permette al piranometro di non essere selettivo alle varie lunghezze d'onda.

L'energia radiante è assorbita dalla superficie annerita della termopila, creando una differenza di temperatura tra il centro della termopila (giunto caldo) ed il corpo del piranometro (giunto freddo). La differenza di temperatura tra giunto caldo e giunto freddo è convertita, grazie all'effetto Seebeck, in una differenza di potenziale linearmente proporzionale alla differenza di temperatura.

Indicando con S , la sensibilità dello strumento misurata in ($\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$), è possibile valutare la radiazione G conoscendo il segnale in Volt ai capi della termopila. Pertanto, collegando il sensore al sistema di acquisizione che

riceve in ingresso la differenza di potenziale (DDP) ai capi della sonda, la radiazione globale G si ottiene come:

$$G = \frac{DDP}{S} \quad (V.2)$$

LP PYRA 03 è provvisto di una cupola in vetro di diametro esterno di 32 mm e spessore 4 mm al fine di garantire un adeguato isolamento termico della termopila dal vento. La cupola, inoltre, protegge la termopila dalla polvere che depositandosi sulla parte annerita ne potrebbe modificare la sensibilità spettrale. In particolare, il campo spettrale del piranometro, determinato dalla trasmissione della cupola in vetro, è compreso tra 305 nm e 2800 nm, come indicato in Figura V.13b.

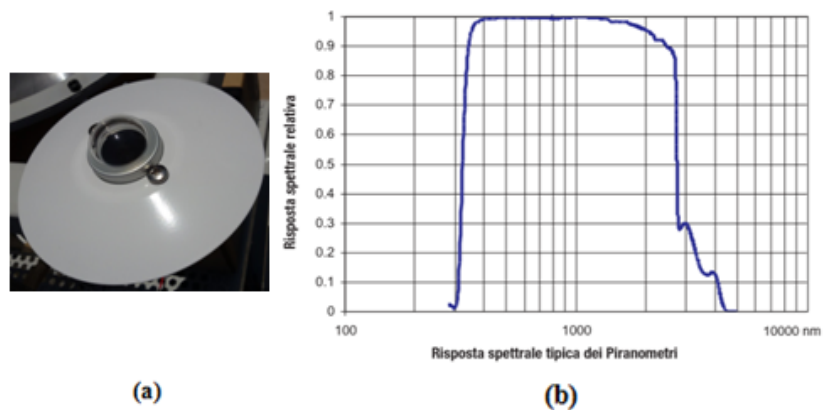


Figura V.13 (a) Il piranometro LP PYRA 03; (b) risposta spettrale

Per evitare che in particolari condizioni climatiche si formi la condensa sulla parte interna della cupola, all'interno del piranometro sono inserite pastiglie di silica – gel che assorbono l'umidità.

LP PYRA 03 rientra nei piranometri di Seconda Classe secondo la norma ISO 9060, presenta un'accuratezza di $\pm 1.5\%$, mentre il fattore di calibrazione (o sensibilità) S , riportato dal costruttore è $15.51 \text{ mV}/(\text{kW}/\text{m}^2)$.

Il piranometro, come già mostrato in Figura V.11a, è montato sull'asse della lente, in modo da potersi muovere contestualmente con l'insieme ottica – cella, secondo l'asse Nord – Sud.

Per la misura della radiazione diretta bisogna prevedere un sistema di ombreggiamento che oscuri l'elemento sensibile facendo in modo che il piranometro valuti esclusivamente la radiazione diffusa. In questo modo, sottraendo tale componente alla radiazione globale misurata, si ricava la radiazione diretta. Stime più puntuali della radiazione diretta sono effettuate sfruttando, soprattutto quando possibile, un piroeliometro. Il suo funzionamento è basato sulle caratteristiche di un sensore che restituisce una tensione proporzionale alla intensità della radiazione luminosa che lo

colpisce. Il sensore è posto alla estremità di un tubo in modo da essere illuminato solo dai raggi quasi paralleli provenienti dal disco solare. Per poter effettuare la misura con continuità, il pireliometro deve essere tenuto costantemente puntato verso il disco solare.

5.4.3. Il sistema di acquisizione dei dati

Il sistema di acquisizione dei valori relativi alle misurazioni dei sensori sul campo è rappresentato dal DataLogger “dataTaker DT80”, riportato in Figura V.14. Le principali misure ricavate da tale sistema sono: la radiazione globale, la tensione ai capi della cella, le temperature prima indicate.

Il DataLogger è un acquirente automatico di dati che permette la visualizzazione e la memorizzazione delle misure di uno o più parametri secondo una frequenza di campionamento opportunamente scelta.

Questo dispositivo fornisce una serie di caratteristiche e funzionalità che lo rendono utilizzabile per una varietà di applicazioni. Il DT80, dotato di display, è robusto, isolato, di basso consumo di potenza e caratterizzato da 18 bit di risoluzione.



Figura V.14 *DataTaker DT80*

Il DataTaker DT80 può memorizzare fino a 10 milioni di dati e la sua memoria è espandibile. I dati possono essere trasferiti per mezzo di porte USB oppure tramite FTP. È possibile connettersi al DT80 in locale, in remoto o tramite Internet. L'interfaccia web “dEX” permette agli utenti di configurare il DT80, di accedere e memorizzare i dati registrati, visualizzare e monitorare le misurazioni in tempo reale utilizzando un browser web. I dati possono essere visualizzati sia in formato grafico che tabellare, oppure con opportune icone configurabili dal sistema. I dati, inoltre, possono essere scaricati in formato CSV e facilmente elaborati. Sostanzialmente, il DataLogger è in grado di trasformare i dati elettrici in ingresso in dati fisici (temperatura, radiazione ecc).

Esso può inoltre misurare input come voltaggio, corrente, resistenza e frequenza (Intelligent Dat, Logging Products). Il DT80 presenta otto canali digitali bidirezionali, che utilizzano una logica binaria, e cinque canali analogici indipendenti. Con la presenza di un'estensione, tali canali possono

arrivare fino a 50. Nella configurazione dell'apparato di misura, ai canali analogici sono collegati la cella fotovoltaica, il piranometro e le termo – resistenza. Vediamo nello specifico, nel paragrafo seguente, come ciascun sensore è collegato e configurato.

5.4.3.1. Connessione dei sensori al sistema di acquisizione

Il collegamento dei sensori, precedentemente descritti, ai canali del sistema di acquisizione si distingue principalmente in base al numero di fili presenti (positivo, negativo, neutro e messa a terra).

Per la connessione del sensore, il sistema va configurato, definendo il canale al quale collegarlo, la tipologia di segnale ed il tipo di collegamento. In Figura V.15, sono riportati i collegamenti dei sensori al DT80.

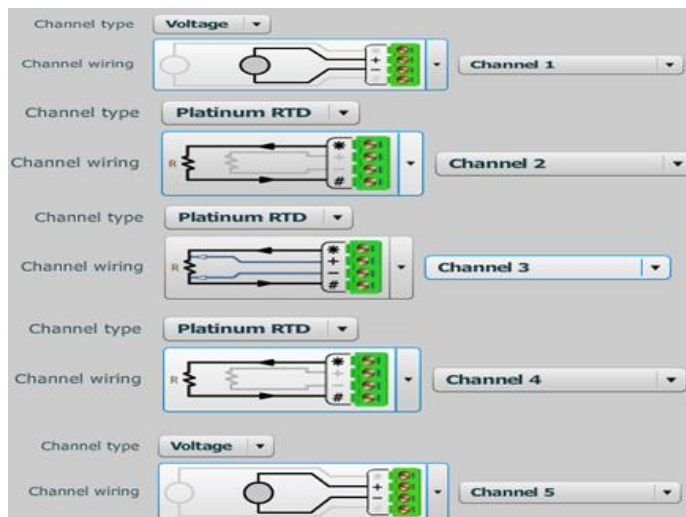


Figura V.15 Collegamento dei sensori al DataLogger

Nello specifico:

- Per la tensione della cella si impiega il canale 1 con un collegamento a 2 fili: positivo (+), negativo (-).
- Per la temperatura sopra cella, una RTD di tipo PT100 è collegata al canale 2 attraverso tre fili: neutro (*), positivo (+), messa a terra (#).
- Per la temperatura sotto cella, una RTD di tipo PT100 è collegata al canale 3 attraverso quattro fili: neutro (*), positivo (+), negativo (-), messa a terra (#).
- Per la temperatura ambiente, una RTD di tipo PT100 è collegata al canale 4 attraverso tre fili: neutro (*), positivo (+), messa a terra (#).

Capitolo 5

- Per la radiazione globale, il piranometro LP PYRA03 è collegato al canale 5 tramite quattro fili: neutro (*), positivo (+), negativo (-), messa a terra (#).

5.5. Le campagne sperimentali effettuate

L'impianto a concentrazione progettato ed allestito nelle sue varie configurazioni insieme all'apparato di misura predisposto e configurato, come descritto nei paragrafi precedenti è stato utilizzato per differenti campagne sperimentali. Nello specifico, le prove hanno riguardato principalmente due periodi non consecutivi:

- Una prima campagna è stata svolta tra Dicembre 2014 e Settembre 2015;
- Una seconda campagna ha interessato il periodo tra Gennaio ed Ottobre 2016.

In generale, le prove hanno riguardato circa 2 – 3 giorni a settimana con una durata che, a seconda del periodo, andava dalle 4 alle 7 ore giornaliere. L'intervallo di campionamento utilizzato per l'acquisizione dei dati è stato di 15 secondi. A seconda del tipo di prova e della rilevanza della misura effettuata, si sono mediati i valori su diversi orizzonti temporali, considerando valori al minuto oppure orari. Le prove hanno permesso di:

1. Costruire il database per la selezione degli input, addestramento, validazione e test delle differenti reti neurali configurate al fine di prevedere la radiazione globale e diretta;
2. Costruire il database per la selezione degli input, addestramento e test del modello Random Forest per la valutazione della temperatura della cella;
3. Ottenere dati sperimentali per implementare i modelli termici teorici in regime transitorio;
4. Caratterizzare la cella a concentrazione costante nelle sue configurazioni;
5. Caratterizzare la cella a concentrazione variabile;
6. Analizzare la cella dal punto di vista dell'elettroluminescenza;
7. Valutare il funzionamento dell'impianto.

La fase di costruzione del database di misure sperimentali per implementare i diversi modelli ha interessato tutto il periodo delle prove aumentando, di volta in volta, il quantitativo dei dati raccolti. Per quanto riguarda la fase di caratterizzazione della cella, va sottolineato che le prove della prima campagna hanno permesso di caratterizzare la cella e le sue configurazioni a concentrazione costante. In questo caso, partendo dalla configurazione di

sistema completo, si sono valutati tutti i parametri di interesse, come vedremo in seguito. La caratterizzazione a concentrazione variabile, invece, sempre impiegando la configurazione completa, ha sfruttato la possibilità di variare la distanza focale della lente per ottenere differenti valori di concentrazione. Tale fase, che ha riguardato la seconda campagna sperimentale, ha permesso di rivalutare tutti i parametri in funzione di un fattore di concentrazione variabile (Theristis et al., 2016). Contestualmente, sempre nella seconda campagna sperimentale, è stato possibile analizzare la cella anche dal punto di vista dell'elettroluminescenza.

La valutazione del funzionamento dell'impianto, invece, che ha riguardato entrambe le campagne sperimentali, riguarda l'analisi della producibilità e del rendimento elettrico, in differenti configurazioni, concentrazioni e condizioni climatiche. Inoltre, sempre inerente a tale fase è la valutazione delle perdite di producibilità per mancato inseguimento.

La fase di caratterizzazione della cella, sottintende una procedura di valutazione sperimentale del fattore di concentrazione, che dettaglieremo più avanti. In questa sezione, possiamo osservare alcuni esempi di rilevazione per i vari scopi indicati.

5.5.1. Raccolta dati per la costruzione dei database

La costruzione di un database di valori per le differenti grandezze in gioco è fondamentale sia per i modelli alle reti neurali che per il modello Random Forest. Inoltre, avere informazioni puntuali sulla temperatura della cella, consente anche l'implementazione di parte dei modelli termici in regime transitorio.

Le principali grandezze monitorate durante le campagne sperimentali sono:

1. temperatura sotto e sopra la cella;
2. temperatura ambiente;
3. tensione ai capi della cella;
4. resistenza;
5. corrente foto – generata;
6. radiazione globale e diretta;
7. concentrazione;
8. energia elettrica prodotta.

Partendo da un intervallo di campionamento di 15 secondi, alcune misurazioni sono state mediate nel minuto oppure considerando una stima oraria. Di seguito sono riportate alcuni andamenti caratteristici di queste grandezze, durante le prove sperimentali. In Figura V.16 è mostrato un esempio per le misure di temperatura durante una giornata con intervallo di

Capitolo 5

15 secondi, mentre in Figura V.17 è mostrato l'andamento orario della radiazione globale in una giornata soleggiata.

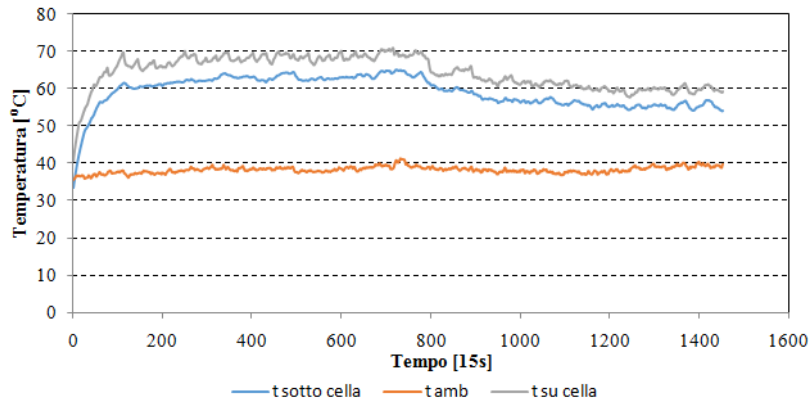


Figura V.16 Esempio di misure di temperatura

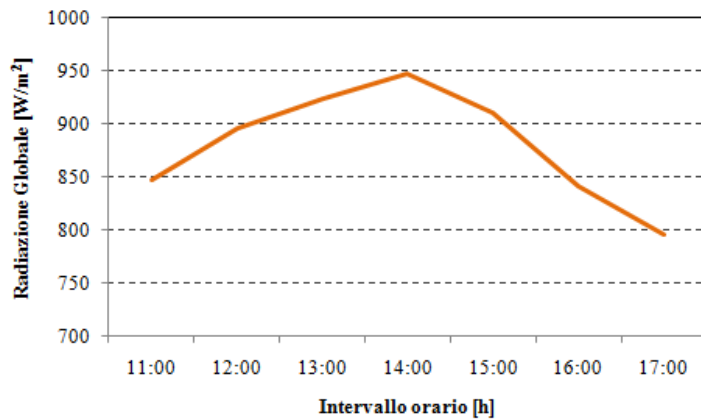


Figura V.17 Esempio di misura della radiazione

5.5.2. Prove sperimentali a concentrazione costante e variabile

per la caratterizzazione in funzione della configurazione

Nel corso delle varie campagne sperimentali condotte, uno dei principali aspetti analizzati è stata la stima del fattore di concentrazione a seconda della configurazione.

La procedura per la caratterizzazione della cella a tripla giunzione e per la valutazione del fattore di concentrazione è esposta nel paragrafo successivo, in questa sezione, analizziamo le prove effettuate ed i principali parametri monitorati a seconda della configurazione.

La prima campagna sperimentale, una volta stabilito un primo fattore di concentrazione del sistema completo, ha permesso di stimare tutta una serie di grandezze parametrizzate, di volta in volta, rispetto ad altre. Nello specifico, mantenendo fissa la distanza focale, ovvero l'altezza della lente rispetto alla cella, le principali analisi della prima fase di prove sono state:

- caratterizzazione I – V a concentrazione costante;
- valutazione di parametri come la tensione e la corrente al variare del carico elettrico;
- valutazione di parametri quali corrente, tensione, temperatura della cella al variare della radiazione solare,
- analisi della producibilità elettrica in funzione della configurazione;
- analisi delle perdite di producibilità per mancato inseguimento;
- stima della temperatura della cella al variare della configurazione.

La seconda campagna sperimentale, ha avuto come principale obiettivo la caratterizzazione della cella e la valutazione del suo funzionamento a concentrazione variabile. In particolare, le principali analisi della seconda campagna sperimentale hanno riguardato:

- caratterizzazione I – V a concentrazione variabile;
- valutazione dei principali parametri della cella in funzione della concentrazione;
- analisi di elettroluminescenza;
- stima di producibilità e rendimento della cella in condizioni di radiazione e concentrazione variabile;
- analisi della temperatura della cella al variare della concentrazione.

I risultati di entrambe le campagne sperimentali sono riportati nel Capitolo 6. Risulta chiaro che, in tutte le condizioni di analisi, è fondamentale stabilire come caratterizzare la cella a tripla giunzione e definire sperimentalmente il fattore di concentrazione ottenuto.

5.6. Caratterizzazione sperimentale della cella in concentrazione

Nel Capitolo 2 è stata esposta la problematica della cella multi – giunzione, analizzando teoricamente il suo comportamento in concentrazione. Inoltre, nel Capitolo 4, a partire dai risultati teorici del funzionamento della cella, si è definito un modello elettrico per il sistema a concentrazione. In questa fase, viste le difficoltà intrinseche nella valutazione del comportamento della cella, si vuole definire sperimentalmente come caratterizzare la cella e valutarne il funzionamento.

Capitolo 5

Grazie al prototipo realizzato presso il Laboratorio di Termodinamica Applicata dell'Università degli Studi di Salerno, si procede a definire la caratterizzazione della cella e valutare il suo comportamento sotto concentrazione variabile. In letteratura, differenti studi hanno investigato la caratterizzazione elettrica della cella. Zilong et al., ad esempio, valutano le prestazioni elettriche e termiche di una cella InGaP/InGaAs/Ge, considerando la concentrazione ottenuta attraverso diverse tipologie di concentratori parabolici (Zilong et al., 2013).

La dipendenza dei parametri della cella dalla concentrazione imposta, può essere analizzata attraverso curve di fitting della caratteristica I – V della cella multi – giunzione in esame (Or e Appelbaum, 2014). Inoltre, la caratteristica I – V di una cella in concentrazione può essere ottenuta anche attraverso modelli alle reti neurali che considerino l'andamento delle variabili in gioco (García – Domingo et al., 2015).

In questo caso, a partire dal prototipo sviluppato, considerando le varie configurazioni analizzate e la possibilità di variare la concentrazione attraverso l'altezza focale della lente, si adotta una strumentazione sperimentale per analizzare i parametri della cella in concentrazione e valutare l'incidenza di quest'ultima. Nello specifico, in questa fase analizzeremo:

- la caratterizzazione della cella;
- le misure di elettroluminescenza;
- la procedura sperimentale per la valutazione del fattore di concentrazione;
- il monitoraggio sperimentale delle prestazioni elettriche del sistema.

5.6.1. Procedura sperimentale per la caratterizzazione

La cella a tripla giunzione del sistema realizzato, che si vuole caratterizzare, è del tipo InGaP/GaAs/Ge con un'area attiva di $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$. Come detto, è posizionata nel fuoco della lente di Fresnel e presenta un'ottica secondaria per uniformare la radiazione incidente per unità di area di cella attiva. In particolare, la cella si trova ad una distanza variabile dall'ottica primaria, funzione della focale.

Tale variabile del processo di caratterizzazione, viene modificata spostando la lente lungo l'asse verticale al fine di variare l'altezza (h), come riportato in Figura V.18. Pertanto, la radiazione diretta incidente sulla cella solare può essere modificata variando il fattore di concentrazione. In Tabella V.2 sono riassunte le caratteristiche del sistema.

Il sistema sperimentale è impiegato in due fasi diverse: la fase di caratterizzazione e la fase di funzionamento. Gli schemi delle due diverse configurazioni sono riportati in Figura V.18.

Tabella V.2 Caratteristiche del sistema

Caratteristiche	Valori
Configurazione	Point – focus
Cella	InGaP/GaAs/Ge
Area della cella	5.5x5.5 mm ²
Ottima primaria	Lente di Fresnel
Diametro dell'ottica	30 cm
Ottica secondaria	Caleidoscopio

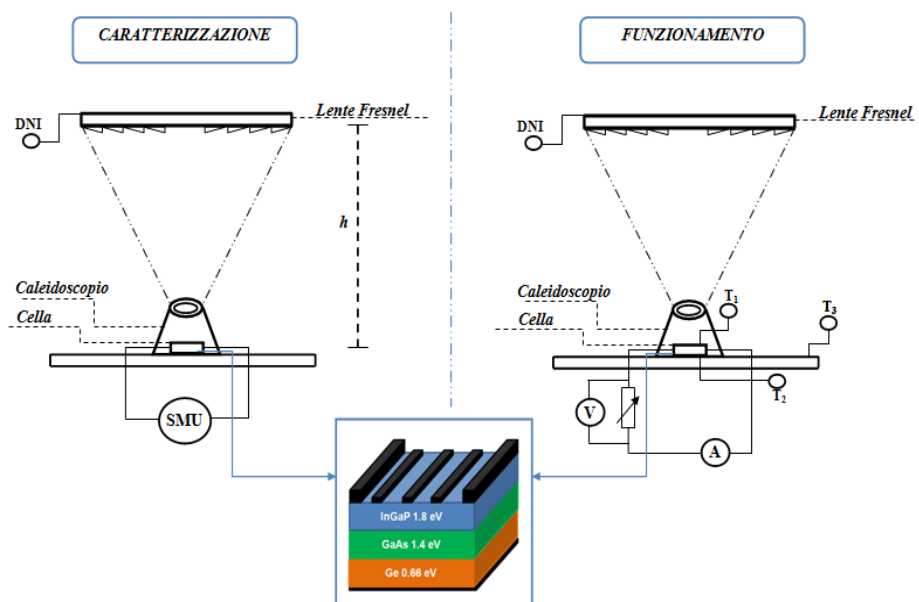


Figura V.18 Schemi operativi per le fasi di caratterizzazione e funzionamento

Nella fase di caratterizzazione, i parametri sono valutati modificando il fattore di concentrazione tramite l'altezza h e sfruttando un dispositivo aggiuntivo, ovvero la Source Meter Unit (SMU). Tale apparecchio, nello specifico un'unità Keithley 2400, permette di applicare una tensione variabile e rilevare automaticamente tutti i parametri della cella quali:

- tensione di circuito aperto (V_{oc});
- corrente di corto circuito (I_{sc});
- rendimento (η);
- fill factori (FF);
- resistenza serie (R_s);
- resistenza di shunt (R_{sh}).

Capitolo 5

Nella fase operativa, la producibilità ed il rendimento elettrico del sistema vengono analizzati con riferimento a diverse concentrazioni. In questa configurazione, un carico variabile è collegato in serie alla cella, ed il DataLogger (DT80) viene impiegato per misurare tensione, corrente e temperature. Attraverso la SMU, è quindi possibile valutare per ogni configurazione e concentrazione sia V_{oc} che la I_{sc} , in modo da ottenere la caratteristica $I - V$ in ogni condizione (Ishibashi et al., 2008).

5.6.2. Misure di elettroluminescenza

La misura dell'elettroluminescenza (EL) della cella a tripla giunzione viene effettuata mediante l'applicazione di una corrente costante, impiegando ancora una volta la SMU (Renno et al., 2017). L'elettroluminescenza è un tipo di luminescenza che caratterizza alcuni materiali in grado di emettere luce sotto l'azione di un campo elettrico, ovvero quando sono attraversati da una corrente elettrica.

L'elettroluminescenza è il risultato della ricombinazione di elettroni e lacune in un dato materiale, normalmente un semiconduttore. Gli elettroni eccitati rilasciano energia sotto forma di fotoni, e quindi di luce. Prima della ricombinazione, gli elettroni e le lacune sono separati in due distinte zone che formano una giunzione $p - n$, come visto in precedenza.

Gli spettri di elettroluminescenza degli strati InGaP e GaAs sono stati misurati nella gamma di lunghezze d'onda compresa tra 200 e 1100 nm, utilizzando una fibra ottica spettrometrica ad alta risoluzione HR2000. Al contrario, il sistema di misura per l'intensità EL nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 1000 e 2000 nm, relativi allo strato di Ge, consiste in un rivelatore InGaAs, che usa un filtro al silicio ed un convertitore digitale (Landi et al., 2013). In questo modo si può osservare per ciascuna lunghezza d'onda la risposta dello specifico strato di materiale che costituisce la cella. I risultati di tale misura sono riportati nel Capitolo 6.

5.6.3. Procedura sperimentale per la valutazione del fattore di concentrazione

Il fattore di concentrazione, parametro chiave di un sistema CPV/T, permette di definire l'amplificazione della radiazione diretta incidente sulla cella solare. La sua valutazione sperimentale tiene conto delle correnti di corto circuito nelle varie configurazioni. Infatti, la massima corrente in concentrazione potenzialmente ottenibile dalla cella, costituisce una misura indiretta di quanto la radiazione sia stata amplificata, se la si confronta, in condizioni simili, con la massima corrente ottenibile non in concentrazione. Pertanto, sperimentalmente il suo valore viene calcolato come rapporto tra le

correnti di corto circuito nelle varie configurazioni, presentate in precedenza. In questo caso, la configurazione di riferimento, che presenta concentrazione unitaria, è quella che presenta la sola cella senza ottica. Quindi il fattore di concentrazione si può calcolare come (Renno et al., 2017):

$$C = \frac{I_{sc,conf}}{I_{sc,1}} \quad (V.3)$$

dove $I_{sc,1}$, rappresenta il valore della corrente di corto circuito della cella nella configurazione 1, quindi senza ottiche, mentre al numeratore è indicata la corrente di corto circuito della configurazione specifica.

Sfruttando il sistema sperimentale, il valore massimo del fattore di concentrazione può essere valutato, nella configurazione completa, stimando la corrente di corto circuito al variare dell'altezza h della lente. La procedura sperimentale per la valutazione del valore C considera le tre differenti configurazioni del sistema. A partire dall'equazione V.3, il fattore di concentrazione nella configurazione 2, che prevede il solo caleidoscopio, può essere espresso come:

$$C_2 = \frac{I_{sc,cal}}{I_{sc,1}} \quad (V.4)$$

dove $I_{sc,cal}$ rappresenta la corrente di corto circuito sperimentalmente misurata, nella stesse condizioni considerate nel misurare $I_{sc,1}$, quando è presente il solo caleidoscopio. Il fattore di concentrazione che maggiormente interessa è quello della configurazione 3, che prevede l'intero sistema (lente e caleidoscopio), e che rappresenta l'insieme di valori di C più alti. Esso è espresso come:

$$C = \frac{I_{sc,tot}}{I_{sc,1}} \quad (V.5)$$

Al fine di definire il massimo valore di C per il sistema sperimentale, l'altezza della lente è costantemente variata e la $I_{sc,tot}$ viene valutata mediante la SMU. Una volta raggiunto il valore massimo per la I_{sc} nella terza configurazione, allora avremo individuato il valore massimo di C . Partendo dal valore corrispondente di h , il fattore di concentrazione nella terza configurazione può essere variato al fine di valutare i parametri della cella sotto diversi livelli di illuminazione. Inoltre, si può definire un valore intermedio di C , come il rapporto tra la corrente massima di corto circuito nella terza e seconda configurazione:

$$C_{int} = \frac{I_{sc,CPV}}{I_{sc,cal}} \quad (V.6)$$

Questo valore rappresenta l'aumento della concentrazione che la lente Fresnel riporta rispetto al caleidoscopio. Il valore massimo di C determinato sperimentalmente è impiegato per il reale funzionamento del sistema. I risultati di tale procedura sono riportati nel Capitolo 6.

5.6.4. Monitoraggio sperimentale delle prestazioni del sistema

Le prove sperimentali riguardanti le prestazioni durante il funzionamento del sistema a concentrazione hanno interessato entrambe le campagne di misura. In particolare, durante la seconda campagna sperimentale si è analizzato il comportamento del sistema sotto diversi livelli di illuminazione, una volta definiti tutti i parametri della cella.

La definizione del valore massimo di C , e dell'altezza h , permette di valutare le prestazioni elettriche in condizioni operative reali. Il funzionamento del sistema dipende da diversi fattori esterni quali: temperatura ambiente, radiazione diretta, livello di nuvolosità. Inoltre, una volta impostato il fattore C , altre variabili interne, come per esempio la temperatura della cella possono influenzare il sistema operativo.

Tutti questi parametri influenzano la producibilità elettrica e l'efficienza. Partendo dalla condizione di massimo C e assumendo una radiazione uniforme concentrata sulla cella, le prestazioni del sistema CPV/T sono state studiate in diverse condizioni esterne. I test sono effettuati con diversi livelli di radiazione diretta, considerando giornate di soleggiate e nuvolose. L'apparecchiatura di misura prima descritta, rende disponibile radiazione diretta (G_{dir}), quindi, l'irraggiamento diretto reale sulla cella ($G_{dir, reale, c}$) può essere espresso come:

$$G_{dir, reale, c} = G_{dir} \cdot C \cdot A_c \quad (V.7)$$

Tale valore dipende dal valore C e dall'area della cella (A_c). La potenza elettrica reale della cella può essere valutata come:

$$P_{reale, c} = V \cdot I \quad (V.8)$$

Dove V ed I sono rispettivamente la tensione e la corrente misurate. Pertanto il rendimento reale della cella, durante il funzionamento, può essere espressa come:

$$\eta_{reale, c} = \frac{P_{reale, c}}{G_{dir, reale, c}} \quad (V.9)$$

Tale efficienza può essere confrontata con i valori ottenuti durante la fase di caratterizzazione.

5.7. Progettazione di un secondo prototipo sperimentale di tipo

line – focus

L'attività sperimentale si conclude con la definizione e progettazione di un secondo impianto sperimentale. Nello specifico, dopo aver valutato, tramite il primo prototipo, le potenzialità di un sistema point – focus con

ottica rifrattiva, l'attenzione si è rivolta verso configurazioni line – focus. Quest'ultimo tipo di schema, modellato in fase teorica sia dal punto di vista elettrico che termico, presenta delle sostanziali differenze rispetto al primo. Infatti, dal punto di vista dell'ottica, l'installazioni di dispositivi rifrattivi risulta molto complicata in quanto richiede delle lenti progettate ad hoc, pertanto è principalmente configurato con ottiche di tipo riflessivo.

In questo caso, inoltre, la concentrazione avviene lungo una linea, permettendo la presenza di un unico concentratore e rendendo possibile il montaggio delle celle alla minima distanza possibile.

Infine, tale configurazione, risulta più compatta e di facile installazione, anche se, consente fattori di concentrazione più bassi, ma richiede una minore precisione nel sistema di inseguimento, poiché esso va a movimentare un unico componente. In definitiva, i principali svantaggi nell'impiego di una configurazione line – focus sono legati all'impossibilità nel riconvertire le ottiche, alla difficoltà nel poter estendere in sistema in maniera modulare ed al minore fattore di concentrazione raggiunto.

Tuttavia, essa presenta notevoli vantaggi, soprattutto dal punto di vista dello scambio termico in quanto la struttura occupa minore spazio a parità del numero di celle. Inoltre, il montaggio delle celle l'una accanto all'altra consente di aumentare l'area attiva di scambio termico, in modo da raggiungere maggiori livelli termici;

Da tale analisi, le principali linee guida seguite nella progettazione di un prototipo line – focus riguardano la definizione dell'ottica riflessiva in termini geometrici e di struttura e la necessità di fornire più gradi di libertà possibili. In Figura V.19 possiamo osservare il progetto preliminare, con l'indicazione dei possibili movimenti. Nello specifico, le celle sono montate sul tubo e rivolte verso il concentratore lineare, mentre ai due movimenti Est – Ovest e Nord – Sud, per l'inseguimento del moto apparente del Sole, si aggiunge la possibilità di modificare la distanza focale.

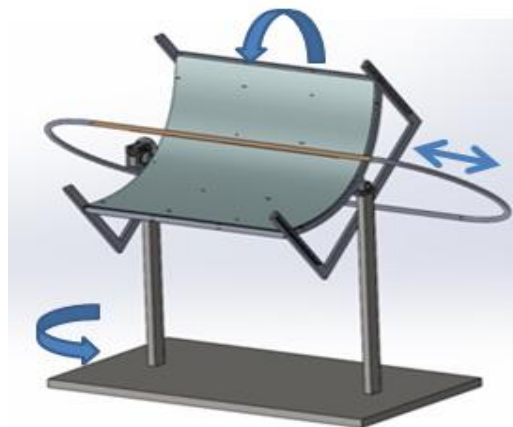


Figura V.19 Progetto del prototipo sperimentale line – focus

5.7.1. Definizione del fattore di concentrazione e progettazione

ottica

La progettazione dell'ottica deve tener conto dei limiti geometrici legati all'angolo di accettazione. In generale, considerando il Sole come una sorgente all'infinito rappresentata da un disco, la relazione tra angolo di accettazione (θ) e fattore di concentrazione è:

$$\theta(C) = \sin^{-1} \sqrt{\frac{1}{C}} \quad (\text{V.10})$$

Considerando la divergenza dei raggi solari che giungono sulla Terra, il limite in concentrazione per un sistema ideale tridimensionale restituisce un angolo minimo di 0.267° con un fattore massimo nell'ordine di 10^4 . Tuttavia, dal momento che un concentratore lineare rappresenta una configurazione bidimensionale, il limite in concentrazione diviene un rapporto tra le lunghezze in gioco:

$$C_{\text{max},2D} = \frac{R}{r} = \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (\text{V.11})$$

In questo caso, pur considerando un angolo ideale di 0.267° , il fattore massimo ottenibile è circa 212. A partire da tali valutazioni, per un concentratore lineare, dal punto di vista geometrico, possiamo considerare il fattore di concentrazione espresso come il rapporto tra l'apertura della parabola alla sua sommità (distanza lineare tra i due punti estremi della parabola) e la larghezza del corpo ricevitore, o dalla circonferenza dell'eventuale tubo in posizione focale, avendosi la stessa lunghezza per lo specchio e per il ricevitore.

A rigore, dal computo della superficie A del concentratore andrebbe detratta la proiezione della superficie A_r del ricevitore che, ombreggiando il concentratore, riduce la radiazione solare raccolta. In effetti è lecito, visti i rapporti di dimensioni in gioco, trascurare questo effetto di ombreggiamento. A partire dallo schema in Figura V.20, si possono effettuare alcune stime sulla geometria e la concentrazione.

Assegnata una parabola generica di vertice O ed equazione $y = kx^2$ (con fuoco $f = 1/4k$), si possono definire le equazioni dei tre raggi riflessi dal generico punto P del concentratore, di coordinate (x_0, y_0) .

Imponendo $x=0$ si ottiene la distanza fra il vertice e l'intersezione con l'asse della parabola del raggio riflesso dal punto (x_0, y_0) .

I principali parametri della parabola sono la sua lunghezza focale (f), responsabile della grandezza dell'immagine focalizzata, ed il valore di troncatura (a), responsabile della quantità di energia che incide sul dispositivo e che sarà concentrata in un'area di dimensioni minori.

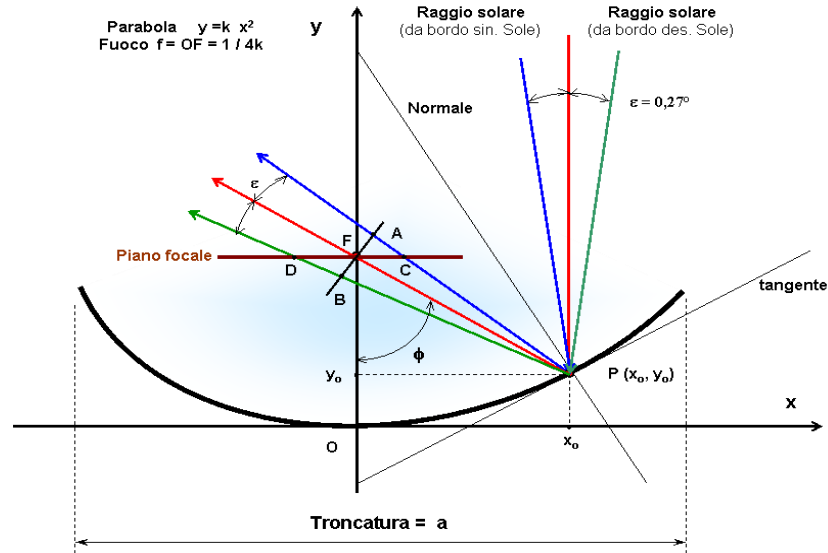


Figura V.20 Schema per la progettazione ottica

E' uso comune trattare i problemi geometrici ed energetici di questi tipi di collettori in funzione del parametro adimensionale f/a . In particolare, l'angolo di troncatura (ϕ) risulta:

$$tg\left(\frac{\phi}{2}\right) = \frac{1}{4 \cdot \left(\frac{f}{a}\right)} \quad (V.12)$$

Tale angolo incide sulla concentrazione, nello specifico, in Figura V.21 è possibile osservare l'andamento di C rispetto al rapporto tra distanza focale e troncatura.

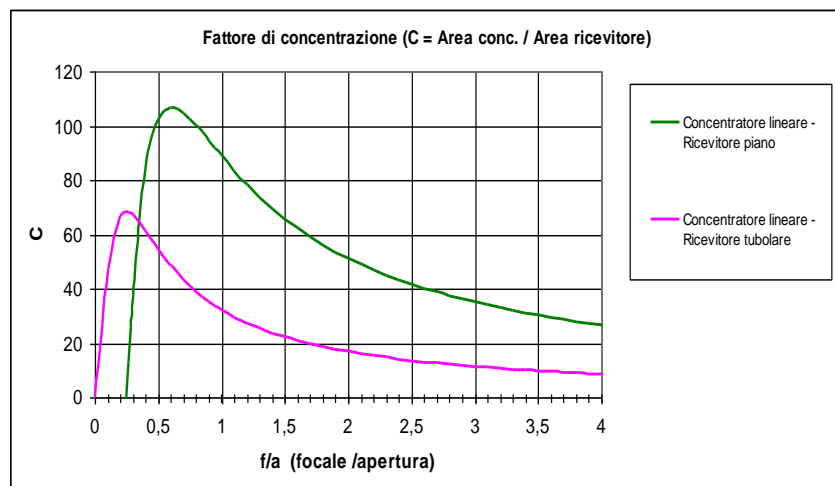


Figura V.21 Concentrazione in funzione di troncatura e distanza focale

Capitolo 5

Scegliendo un angolo di troncatura di 90° , poiché questo permette coincidenza tra lunghezza focale ed altezza della parabola e garantisce un ottimo fattore di intercettazione, e considerando 60 celle da 1 cm di lato con una lunghezza totale su cui concentrare la luce di circa 120 cm, il fattore di concentrazione ottenuto è di circa 107, come riportato in Tabella V.3.

Tabella V.3 Risultati della progettazione ottica

C	Φ	Lato cella	Numero celle	Focale
107	90°	1 cm	60	27 cm

Possiamo quindi osservare in Figura V.22, le varie viste della struttura ottica progettata, dove le dimensioni sono riportate in mm.

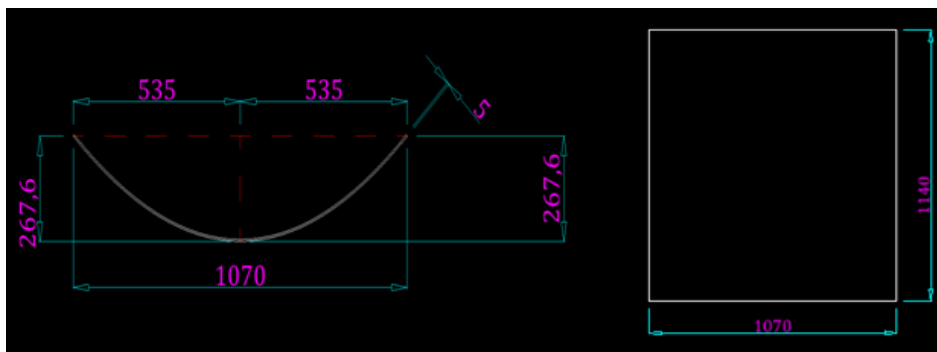


Figura V.22 Viste del concentratore progettato

5.7.2. Elementi per la movimentazione ed assieme definitivo

Il prototipo sperimentale line – focus richiede la progettazione di una serie di elementi, al fine di garantire tutti i gradi di libertà richiesti. In questo senso, si è proceduto col definire:

- un supporto di base, dotato di sistema per la movimentazione Est – Ovest (Figura V.23a);
- due motoriduttori ed un albero di rotazione per l'inseguimento Nord – Sud (Figura V.23b);
- un elemento cilindrico a scorrimento per la variazione della distanza focale (Figura V.23c);
- un supporto per il concentratore lineare (Figura V.23d).

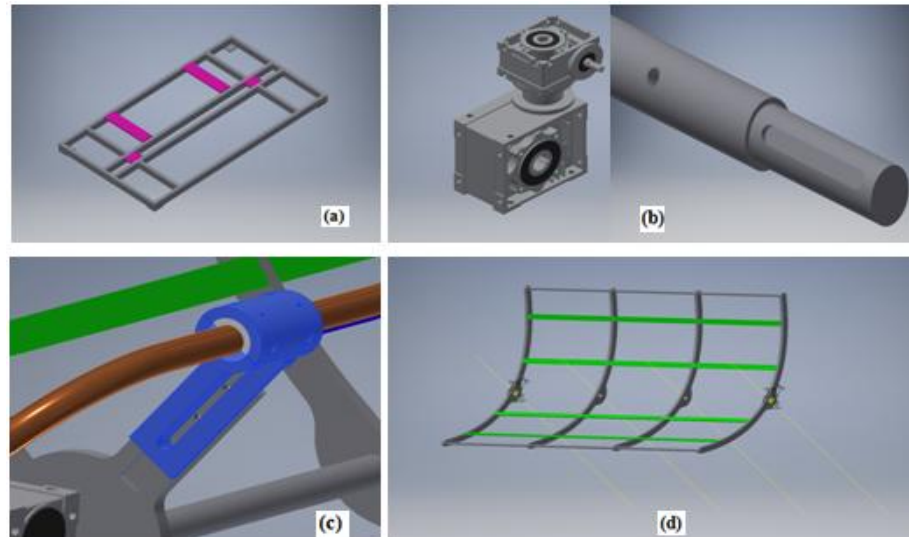


Figura V.23 (a) supporto base; (b) motoriduttori ed albero; (c) elemento per la distanza focale; (d) supporto concentratore

In Figura V.24 si può osservare l'assieme definitivo progettato per il lancio in produzione.

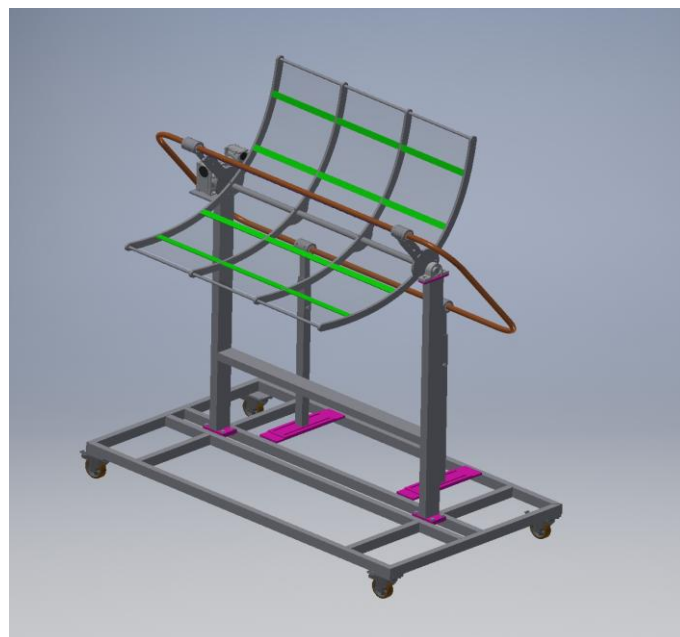


Figura V.24 Progetto definitivo per il lancio in produzione

Capitolo 6: Risultati dell'analisi teorico – sperimentale

6.1. Introduzione

L'analisi presentata nei Capitoli precedenti ha permesso di predisporre tutti gli strumenti teorico – sperimentali, utili alla valutazione di un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione. In particolare, sono state inquadrare le principali problematiche relative alla definizione di un sistema a concentrazione e sono stati mostrati gli strumenti modellistici impiegati per lo studio. Inoltre, al fine di supportare e validare la fase di modellazione, è stata predisposta un'attenta analisi sperimentale che permettesse di raccogliere le misure in campo e che portasse alla definizione di primi prototipi di sistemi a concentrazione.

In questa sezione vengono riportati tutti i risultati conseguiti, a partire dalla prima fase solo teorica, per giungere ad un'analisi completa che tenga conto dei dati sperimentali. La presentazione dei risultati è organizzata in differenti fasi che coinvolgono i vari strumenti teorico – sperimentali adottati. Nello specifico i risultati principali riguardano

- Radiazione globale e diretta incidente;
- Producibilità elettrica e termica in base ad una configurazione preliminare;
- Producibilità in funzione degli algoritmi alle reti neurali;
- Risultati sperimentali delle principali variabili monitorate;
- Caratterizzazione della cella in concentrazione;
- Producibilità reale;
- Temperatura della cella;
- Risultati inerenti i modelli termici in transitorio;
- Analisi del modello integrato;
- Applicazioni aggiuntive.

I differenti aspetti, riportati in precedenza, permettono di valutare i sistemi a concentrazione oggetto di questo elaborato. Va sottolineato che, in

quasi tutte le fasi si impiegano le misure sperimentali raccolte. Pertanto seppur il monitoraggio sperimentale è presentato in una sezione a parte, i dati da esso derivanti sono impiegati in quasi tutte le fasi. In Figura VI.1 sono riassunte, quindi, le varie analisi presentate in questo Capitolo.

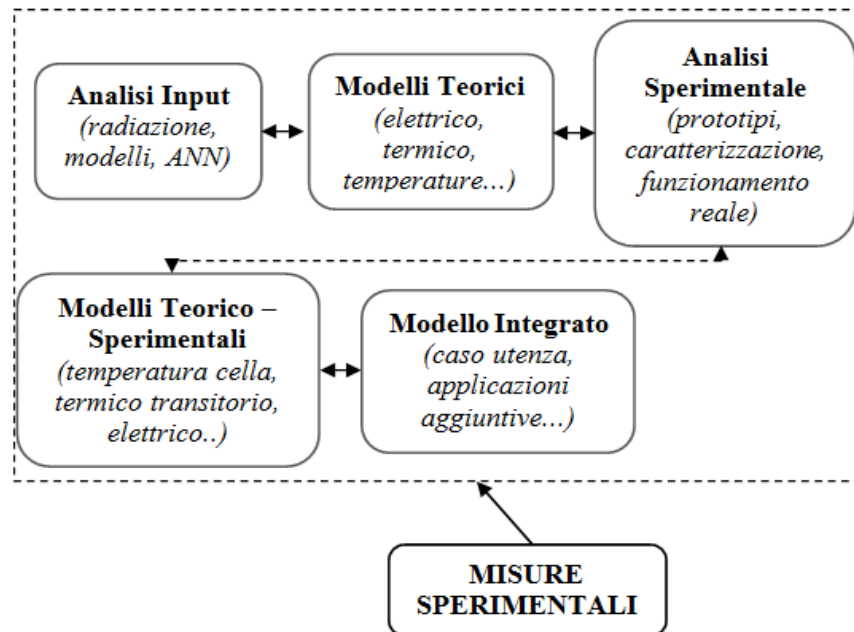


Figura VI.1 Fasi della presentazione dei risultati

6.2. La previsione del potenziale solare incidente

La definizione dell'input per un sistema a concentrazione rappresenta una problematica chiave per la sua valutazione. Tali sistemi, impiegando dispositivi ottici per la concentrazione, sfruttano solo la componente diretta della radiazione solare. Come visto nel Capitolo 2, la valutazione della radiazione solare è influenzata da differenti variabili, tra le quali il sito dell'installazione, le condizioni meteorologiche, la nuvolosità, l'inclinazione della superficie. In questa sezione osserveremo:

- I risultati della previsione della radiazione diretta attraverso un metodo numerico che si basa su equazioni empiriche, riportato nel Capitolo 2;
- La previsione del potenziale solare, quindi sia della radiazione globale che di quella diretta, attraverso il metodo alle reti neurali sviluppato nel Capitolo 3.

Capitolo 6

In particolare, i modelli alle reti neurali permettono di aumentare la qualità della previsione della radiazione, sfruttando dati raccolti da differenti stazioni di misura. Inoltre, tali modelli prevedono prima la definizione della radiazione globale, cui dati sono di più semplice reperimento ed in un secondo momento, una volta validata la metodologia, la previsione della radiazione diretta.

6.2.1. Valutazione della radiazione diretta attraverso un metodo numerico

Il sistema di equazioni presentato nel Capitolo 2, permette una prima valutazione della radiazione diretta, considerando il suo ammontare giornaliero. Tale metodo, tiene conto della posizione geografica e stima alcune variabili astronomiche e meteorologiche quali, l'angolo orario, l'air mass e la nuvolosità. Quest'ultimo parametro, fondamentale per la definizione della radiazione diretta, è stato stimato in percentuale, come riportato in Tabella II.1, in base a dati storici. In Figura VI.2 è riportata la radiazione diretta mensile calcolata per differenti città italiane (Renno e Petito, 2013).

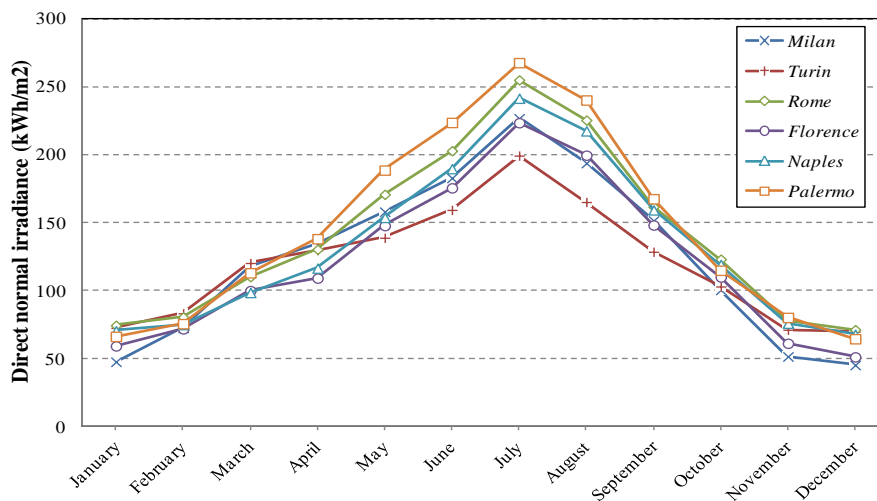


Figura VI.2 Radiazione diretta mensile per varie città italiane

Come si può osservare, tali valutazioni sono di tipo globale, in quanto considerano la radiazione cumulata su base mensile. In Figura VI.3 viene riportato l'andamento giornaliero della radiazione diretta, confrontando valori mediati per differenti regioni italiane. In particolare, il riferimento tiene conto di Nord, Centro e Sud Italia. In questo caso, seppur la valutazione sia giornaliera, i dati mantengono un'elevata generalità, poiché

non considerano input specifici sperimentali ma solo variabili globali, calcolate tramite equazioni.

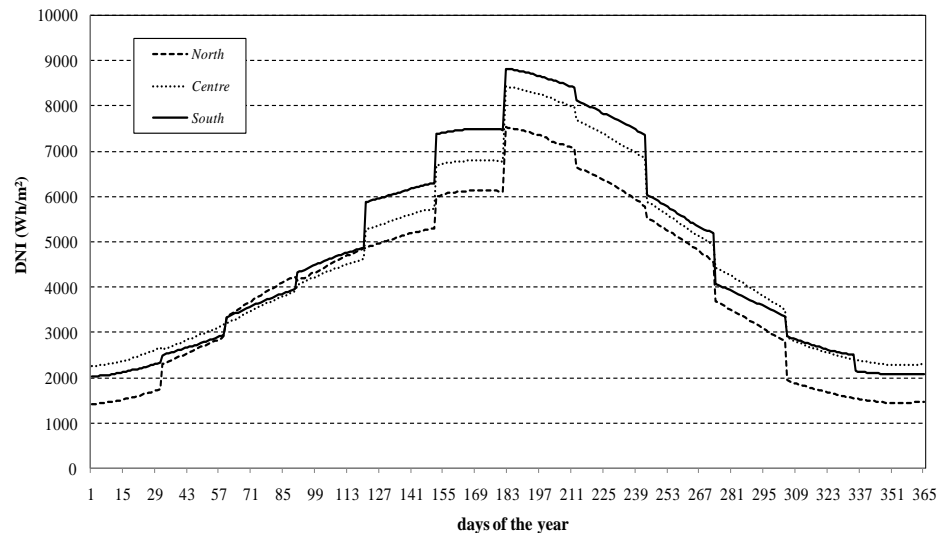


Figura VI.3 Radiazione diretta giornaliera media

I risultati appena esposti, forniscono un'indicazione generale sulla radiazione diretta incidente, utili per valutazioni generali legate al dimensionamento ed alla producibilità di un sistema a concentrazione. Al fine di ottenere dati inerenti all'input, quanto più veritieri possibili, si sono predisposti modelli alle reti neurali.

6.2.2. Previsione del potenziale solare attraverso modelli alle reti neurali

La metodologia proposta nel Capitolo 3 prevede tre differenti livelli di analisi. Dopo la selezione del tipo e del numero di variabili di input per ciascun modello, nove configurazioni topologiche sono state inizializzate sia per la radiazione globale che per quella diretta. Ciascuna di queste configurazioni è stata addestrata e validata, con subset di addestramento e validazione rispettivamente di 10 e 3 mesi.

Il primo step dell'analisi, quindi, permette di scegliere la migliore configurazione topologica in funzione di parametri statistici quali, RMSE, MAPE, MAE e R^2 . Nella seconda fase, le configurazioni scelte sono testate su differenti subset al fine di valutarne le prestazioni. Nella terza fase si provvede a confrontare le prestazioni dei modelli ottenuti con i principali risultati in letteratura. I modelli ANN costituiscono uno strumento integrato per la valutazione del potenziale solare che, come detto, ha come sito

Capitolo 6

obiettivo l'Università degli Studi di Salerno (Fisciano, 40°, 46'23''N, 14°47'52''E).

Inoltre, come visto nel Capitolo 3, l'implementazione del modello per la GR giornaliera, considera dati da molteplici stazioni di misura, pertanto, permette una valutazione per qualsiasi sito. Il modello per la DNI oraria, infine, è uno dei pochi che scende ad un intervallo temporale così dettagliato, infatti impiega un grande ammontare di dati sperimentali e parametri, pertanto costituisce un metodo molto più accurato rispetto a modelli basati su semplici equazioni. L'accuratezza di tale modello può essere osservata, inoltre, nelle simulazioni effettuate, che considerano differenti condizioni climatiche.

6.2.2.1. Scelta della configurazione e risultati per la ANN per la previsione della radiazione globale

La valutazione del potenziale solare è influenzata dalla capacità previsionale delle reti per la GR giornaliera e la DNI oraria. L'analisi di tali componenti permette una precisa stima della bontà di un sistema a concentrazione. L'unicità dell'approccio alle reti neurali presentato risiede nel fatto che la capacità predittiva dei modelli deriva da un processo di ricombinazione topologica che prevede l'investigazione di nove configurazioni.

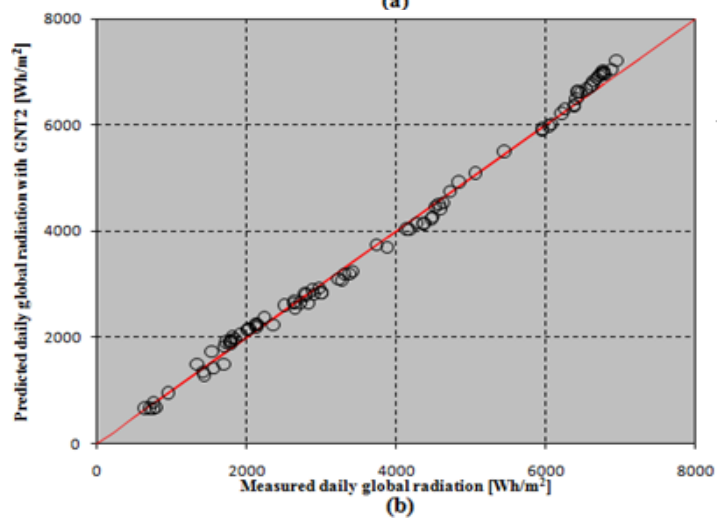
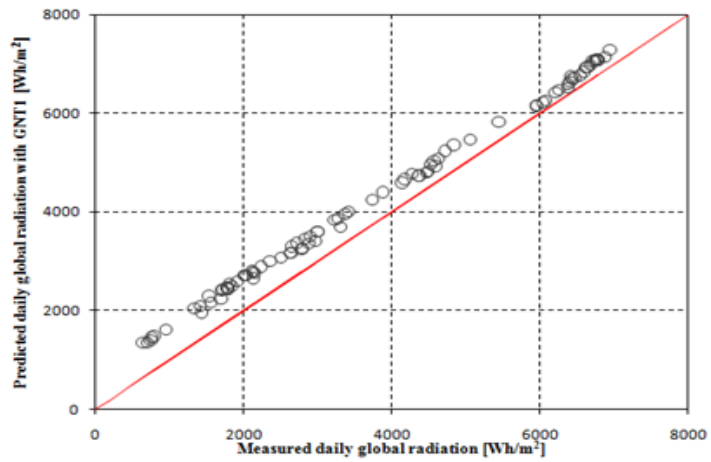
Come visto nel Capitolo 3, una volta stabilito il tipo ed il numero di variabili in input, sono state configurate nove reti, da GNT1 a GNT9, le quali variano in funzione del tipo di funzione di trasferimento e del numero di strati e neuroni nascosti, come riportato in Tabella III.12. L'algoritmo di addestramento impiegato è sempre quello di Levenberg – Marquardt.

In particolare, per ciascuna rete GR, le funzioni di trasferimento implementate per lo strato nascosto e per lo strato di output sono la sigmoide, la lineare e l'iperbolica. In termini di strati nascosti, invece, sono state valutate principalmente due soluzioni: con 1 e 2 strati nascosti. Infine il numero di neuroni nascosti è stato variato da un minimo di 8 ad un massimo di 12. In Tabella VI.1 sono riportati i risultati statistici riferiti alle nove configurazioni. Si può osservare come la rete selezionata sia la GNT2 che prevede 1 strato nascosto, 10 neuroni nascosti, una funzione di trasferimento sigmoide per lo strato nascosto ed una funzione lineare per lo strato di output. Tale configurazione presenta i migliori risultati in termini di RMSE, MAPE e MAE, rispettivamente pari a 153.5 Wh/m², 4.46% and 125.7 Wh/m².

Sebbene il valore di R² non sia il più alto in assoluto, la GNT2 ha mostrato una capacità predittiva globale migliore, come riportato negli scatterplot di Figura VI.4. In particolare, tali grafici, ottenuti in fase di validazione, riportano la correlazione tra valori predetti e valori misurati.

Tabella VI.1 Risultati statistici e scelta per le configurazioni della rete neurale per la GR

<i>Configurazione</i>	<i>RMSE [Wh/m²]</i>	<i>MAPE [%]</i>	<i>MAE [Wh/m²]</i>	<i>R²</i>
GNT 1	568.0	24.8	501.7	0.9898
GNT 2	153.5	4.46	125.7	0.9923
GNT 3	473.2	21.6	371.2	0.9802
GNT 4	584.8	21.1	471.8	0.9928
GNT 5	341.8	7.59	278.2	0.9970
GNT 6	1033	20.1	847.0	0.9841
GNT 7	348.8	7.49	270.7	0.9926
GNT 8	592.3	12.1	469.3	0.9913
GNT 9	414.1	10.9	336.5	0.9882



Capitolo 6

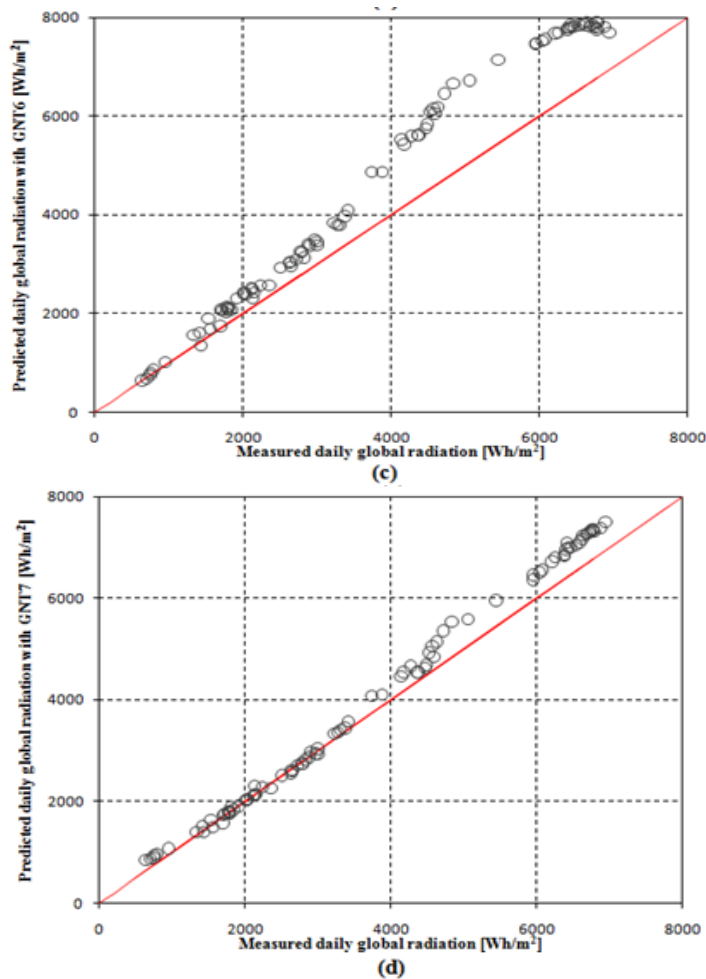


Figura VI.4 Scatterplot di 4 configurazioni della rete neurale per la GR

Graficamente si può osservare la buona corrispondenza tra i valori misurati e quelli predetti per la rete GNT2 (Figura VI.4b). Gli altri scatterplot si riferiscono rispettivamente alle reti GNT1 (VI.4a), GNT6 (VI.4c) e GNT7 (VI.4d). Pertanto una soluzione con due strati nascosti (GNT7) o con 12 neuroni nascosti (GNT6) conduce a valori di RMSE e MAPE più alti rispetto a quella scelta.

Inoltre, sono stati presentati solo quattro dei nove grafici, relativi alle diverse configurazioni, in quanto si vuole sottolineare cosa accade nel passaggio tra funzioni trasferimento lineari e iperboliche (passaggi GNT1 – GNT2) e tra uno e due strati nascosti (GNT7).

In Figura VI.5a viene riportato quindi lo schema definitivo della rete ottenuta, mentre in Figura VI.5b si mostrano, per completezza, i risultati della fase di addestramento di tale rete (Renno et al., 2016b).

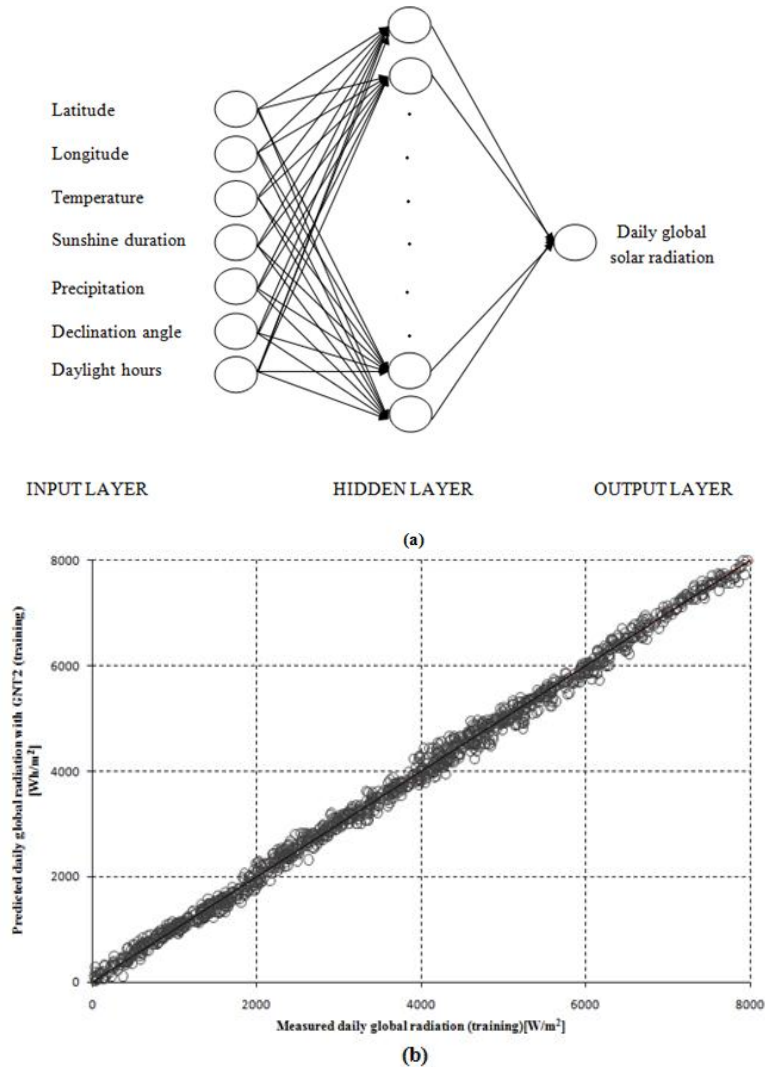


Figura VI.5 (a) Schema della rete GNT2; (b) scatterplot del training

La rete scelta per la previsione della GR giornaliera è stata testata su diversi subset. Un primo si riferisce ai mesi di Marzo, Giugno e Novembre 2014 per la zona obiettivo di Salerno. Questi mesi sono stati scelti in quanto presentano differenti condizioni climatiche. In Figura VI.6 è possibile osservare il confronto tra previsioni e dati misurati. La valutazione finale sui dati di test ha permesso di calcolare nuovamente MSE, MAPE, MAE, R^2 , RMSE e nRMSE. Tali parametri presentano valori più alti rispetto alla fase di validazione, tuttavia tale risultato era atteso in virtù dell'eterogeneità dei dati di test. In questo senso, un MAPE del 4.57%, un RMSE di 160 Wh/m², ed un R^2 di 0.9918 indicano, comunque, un'ottima correlazione da parte

Capitolo 6

della rete. Al fine di valutare definitivamente la capacità predittiva della rete selezionata, nuovi test sono stati condotti considerando differenti luoghi ed anni (Renno et al., 2016b).

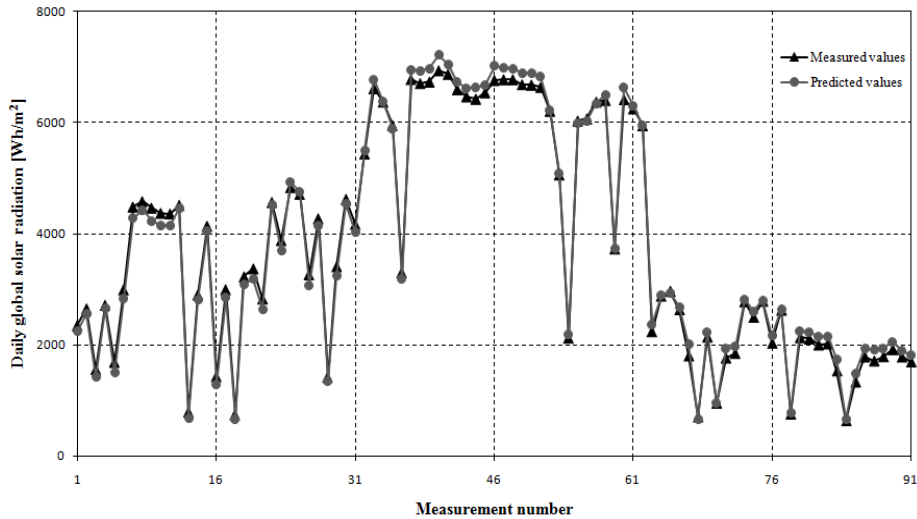
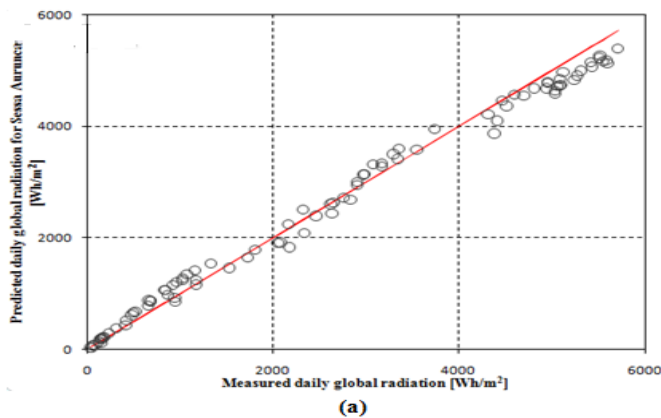
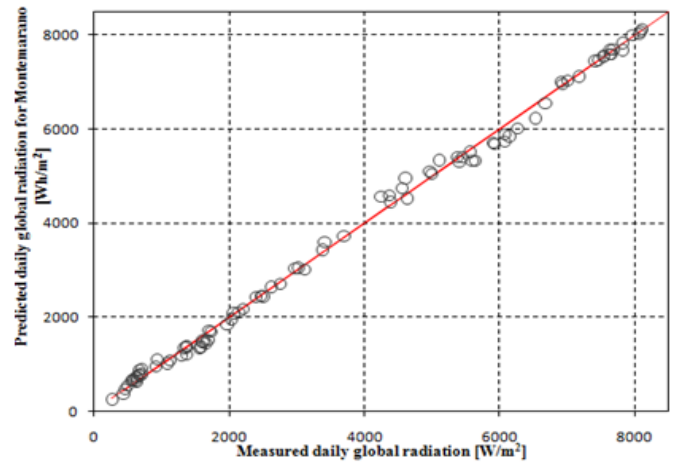


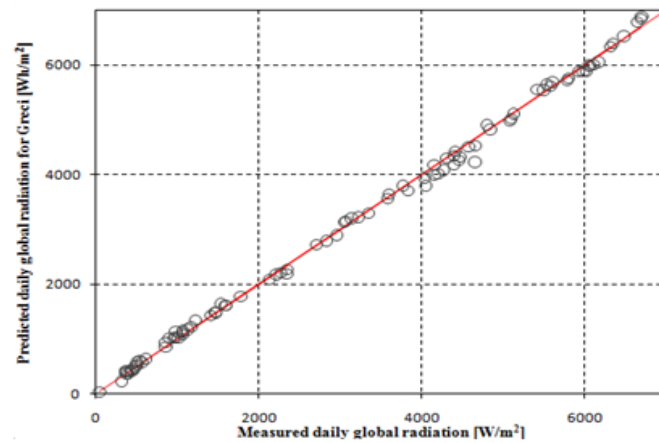
Figura VI.6 Risultati del test della rete per la GR sulla stazione di Salerno

In particolare, sono stati impiegati nuovi dati per Gennaio, Marzo e Giugno 2015 dalle quattro stazioni usate in fase di addestramento (Sessa Aurunca, Montemarano Policastro, Greci, Bussentino), con dati del 2013 e del 2014. Nei grafici di Figura VI.7, è riportato l'andamento dei dati previsti rispetto a quelli misurati. Ancora una volta, i risultati mostrano un'elevata correlazione, confermata dai parametri statistici calcolati. In particolare, i valori di RMSE, MAPE ed R^2 sono rispettivamente 212 Wh/m^2 , 8.1% e 0.983 per Sessa Aurunca(a); 135 Wh/m^2 , 5.21% e 0.991 per Montemarano (b); 122 Wh/m^2 , 4.1% e 0.992 per Greci (c) e 173 Wh/m^2 , 5.71% e 0.988 per Policastro Bussentino (d).

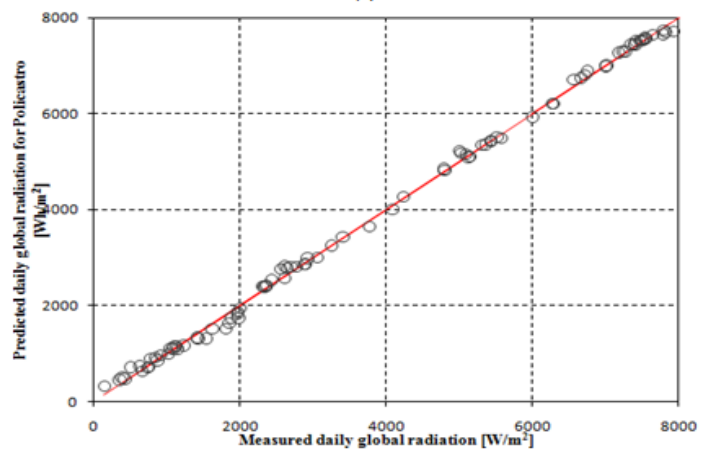




(b)



(c)



(d)

Figura VI.7 Risultati di test per 4 stazioni diverse: (a) Sessa Aurunca, (b) Montemarano, (c) Greci, (d) Policastro Bussentino

6.2.2.2. *Scelta della configurazione e risultati per la ANN per la previsione della radiazione diretta*

L'analisi della migliore configurazione per la rete neurale per la DNI oraria prevede, come per la radiazione globale, lo studio di nove configurazioni topologiche. Quindi, come visto nel Capitolo 3, dopo aver scelto il tipo ed il numero di input per la DNI, nove soluzioni sono state investigate considerando 1 o 2 strati nascosti, funzioni di trasferimento lineari, sigmoidi ed iperboliche e variando il numero di neuroni nascosti tra 4 e 6. Le reti sono state addestrate con dati per sei mesi e validate con dati che considerano due mesi. In tabella VI.2 sono riportati i risultati statistici riferiti al subset di validazione per le varie configurazioni della DNI oraria .

Tabella VI.2 Risultati statistici e scelta per le configurazioni della rete neurale per la DNI

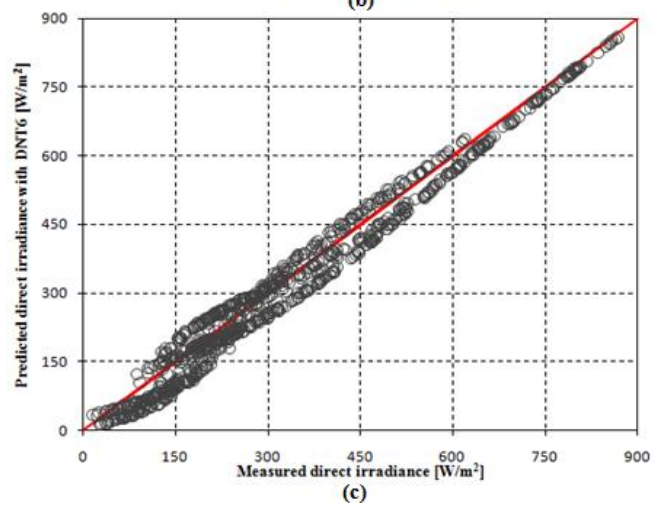
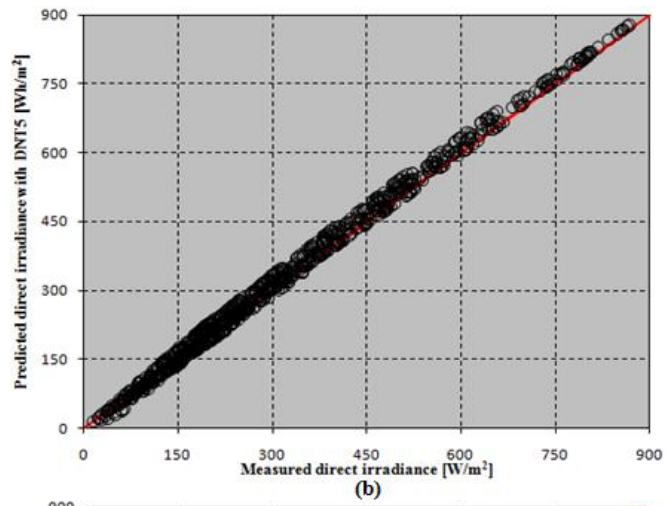
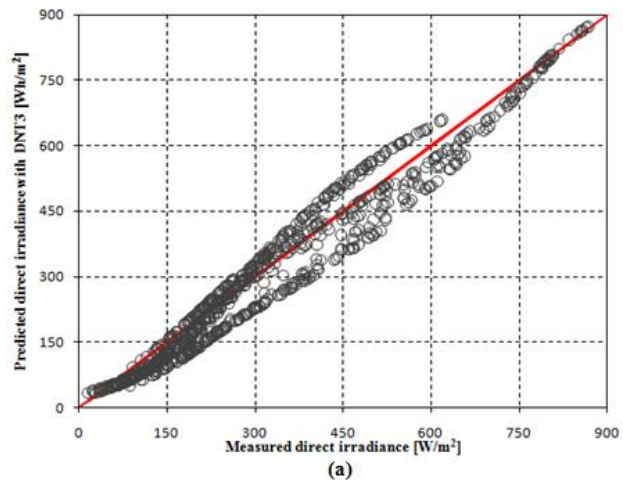
Configurazione	RMSE [Wh/m ²]	MAPE [%]	MAE [Wh/m ²]	R ²
DNT 1	18.4	8.08	15.6	0.9938
DNT 2	18.9	7.30	16.6	0.9949
DNT 3	45.1	14.1	36.5	0.9563
DNT 4	20.3	8.27	16.8	0.9955
DNT 5	17.1	5.38	13.4	0.9956
DNT 6	34.8	15.0	30.5	0.9745
DNT 7	30.7	10.5	26.2	0.9892
DNT 8	26.0	8.06	20.1	0.9883
DNT 9	49.2	17.3	42.5	0.9574

La rete DNT5 è risultata la migliore soluzione per tutti i parametri statistici utilizzati. In particolare essa presenta RMSE, MAPE, MAE e R² rispettivamente pari a 17.1 W/m², 5.38%, 13.4 W/m² e 0.9956.

Lo stesso risultato può essere osservato nei grafici di Figura VI.8, dove i valori previsti e misurati sono confrontati per le reti DNT3 (a), DNT5 (b), DNT6 (c) e DNT8 (d). Anche in questo caso, le figure mostrano situazioni profondamente diverse in termini di funzioni di trasferimento e numero di strati e neuroni nascosti.

Lo schema della rete neurale scelta è rappresentato in Figura VI.9a, mentre in Figura VI.9b è possibile osservare il trend tra dati previsti e misurati durante l'addestramento della rete selezionata.

Tale rete, così configurata, è stata definitivamente testata considerando un subset di un mese, Aprile 2015 (Renno et al., 2016b).



Capitolo 6

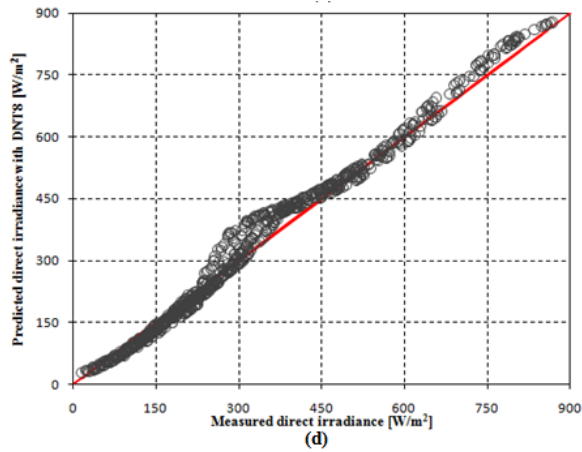


Figura VI.8 Scatterplot di 4 configurazioni della rete neurale per la DNI

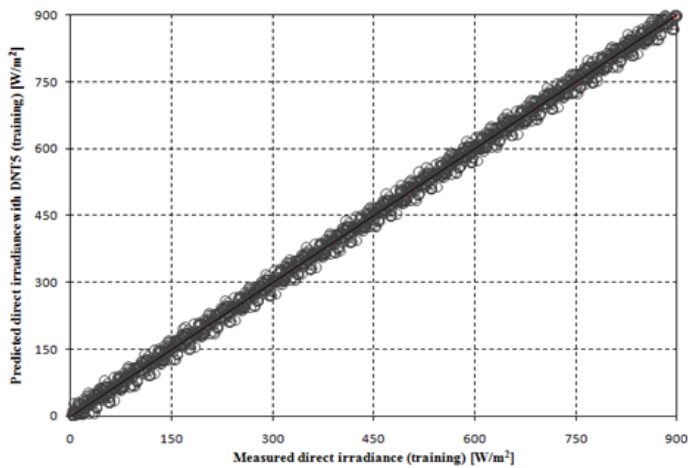
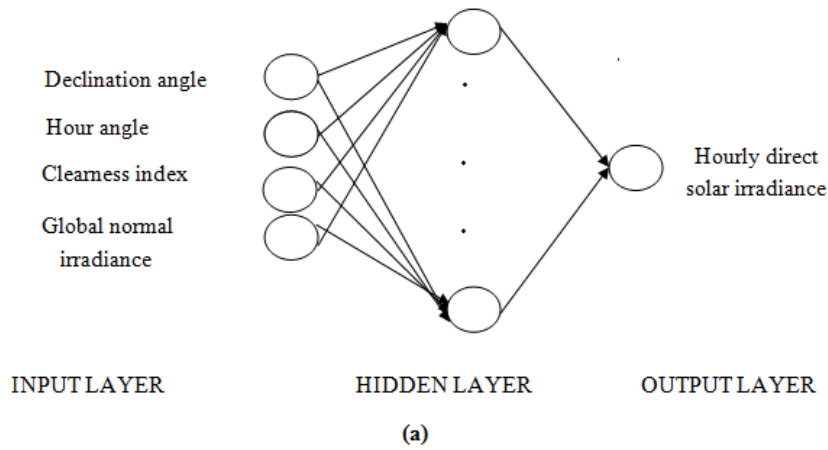


Figura VI.9 (a) Schema della rete DNT5; (b) scatterplot del training

In Figura VI.10 è riportata la capacità di previsione della rete, considerando il test set scelto. In particolare, la buona correlazione tra dati previsti e misurati è confermata dalle stime statistiche ottenute. La rete DNT5, in base al test set scelto, presenta infatti MAPE, RMSE e R^2 rispettivamente pari a 5.57%, 17.7W/m² e 0.994. Tali valori garantiscono una buona accuratezza della previsione della DNI impiegando variabili astronomiche e radiometriche.

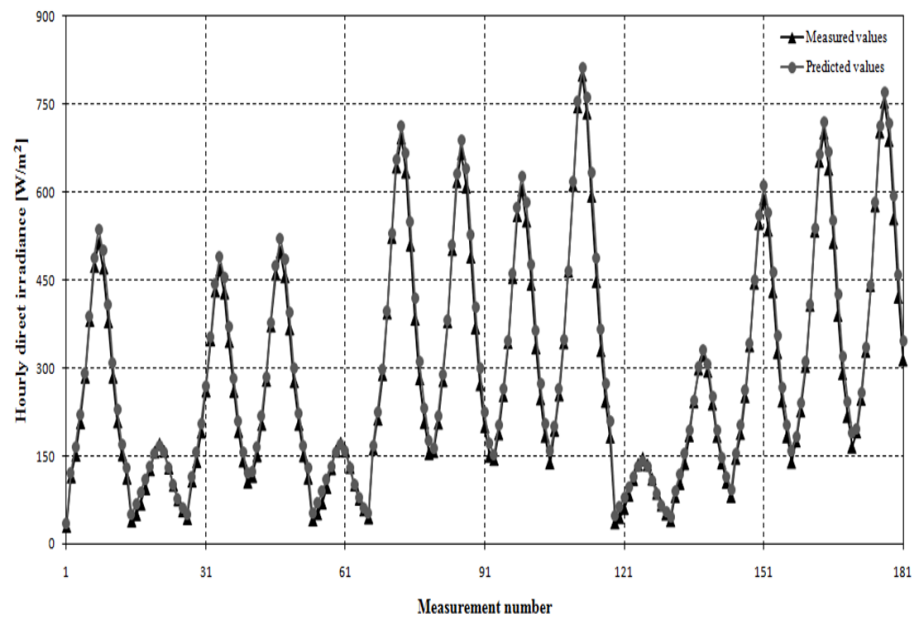


Figura VI.10 Risultati del test della rete per la DNI sulla stazione di Salerno

Il modello permette la valutazione del potenziale di energia solare diretta per il luogo scelto al fine di analizzare un sistema a concentrazione. La capacità di previsione del modello può essere osservata in Figura VI.11. La rete neurale è stata impiegata per simulare la radiazione diretta con riferimento ad una giornata estiva ed una invernale, caratterizzate da differenti situazioni meteorologiche.

In particolare, si può osservare la capacità predittiva del modello per la DNI, considerando le stime per condizioni di differente nuvolosità, implementate attraverso il set di variabili di input.

Infine, in Tabella VI.3 viene mostrata, cumulando su base mensile le simulazioni ottenute attraverso la rete neurale per la DNI, la frazione di radiazione diretta rispetto alla globale. In questo caso, considerando un valore molto basso della radiazione riflessa (albedo), si può stimare anche la radiazione diffusa (Renno et al., 2016b). In termini di radiazione mensile, quindi, si può constatare che la percentuale di radiazione diretta raggiunge una media del 90% in estate, mentre in inverno è intorno all'80%.

Capitolo 6

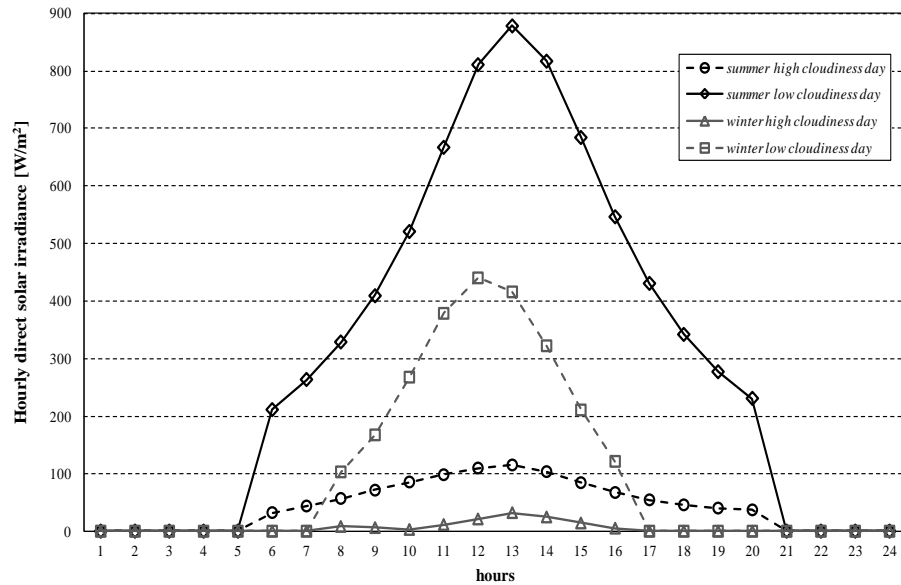


Figura VI.11 DNI oraria in differenti condizioni climatiche tramite le DNT

Tabella VI.3 Frazione diretta mensile della radiazione globale tramite i modelli ANN realizzati

Mese	DNI mensile [kWh/m ²]	GR mensile [kWh/m ²]	Diffusa mensile [kWh/m ²]	Frazione diretta
Gennaio	35.87	45.22	8.67	79.3%
Febbraio	43.73	54.36	9.81	80.5%
Marzo	87.72	104.7	15.5	83.7%
Aprile	110.6	129.9	17.3	85.2%
Maggio	134.2	154.4	17.9	86.9%
Giugno	161.4	178.6	14.6	90.3%
Luglio	169.6	188.2	15.8	90.1%
Agosto	157.4	177.5	17.4	88.7%
Settembre	102.9	121.0	16.2	85.1%
Ottobre	74.13	88.85	13.9	83.4%
Novembre	35.39	44.57	8.51	79.4%
Dicembre	34.03	43.06	8.39	79.0%

6.2.2.3. *Confronto dei risultati ottenuti con la letteratura*

Negli ultimi anni molteplici tecniche sono state sviluppate per la predizione del potenziale di energia solare. I modelli alle reti neurali, i cui risultati principali, in termini di configurazione della rete e test su dati mmisurati, sono stati mostrati nei paragrafi precedenti, sono stati confrontati con differenti modelli. In particolare, analizzando i modelli in letteratura, presentati nel Capitolo 3, il confronto è stato effettuato in termini dei principali parametri statistici individuati. Tale confronto permette una validazione esterna dei modelli alle reti neurali per la previsione della radiazione globale giornaliera e della radiazione diretta oraria.

I valori impiegati per il confronto si riferiscono ai risultati della fase di test per la stazione di Salerno. In Tabella VI.4 sono riassunti i valori statistici per il modello per la GR e per ciascun modello presente in letteratura.

Tabella VI.4 *Confronto con la letteratura della rete per la GR giornaliera*

Modello	MSE [Wh ² /m ⁴]	MAPE [%]	MAE [Wh/m ²]	R²	RMSE [Wh/m ²]	nRMS E [%]
Proposto	25696	4.57%	131.2	0.9918	160.3	3.54%
Azadeh et al., 2009	-	3.00%	-	0.980	-	2.60%
Wang et al., 2011	-	-	-	0.991 0.964	-	3.31% 4.50%
Khatib et al., 2012	135719	5.20%	-	-	342.0	7.96%
Behrang et al., 2010	-	5.21% 5.56%	-	0.9957 0.9952	-	-
Zervas et al., 2008	-	-	-	0.985	-	-
Benghanem et al., 2010	-	-	-	0.976	-	1.31%
Yacev et al., 2011	-	-	-	0.9299	-	8.42%
Bilgili et al., 2012	-	9.23%	278.0	0.9508	-	-

In Tabella VI.5 sono, invece, riportati i parametri del modello alle reti neurali proposto per la DNI oraria e per ciascun modello in letteratura.

Tabella VI.5 *Confronto con la letteratura della rete per la DNI oraria*

Modello	MAPE [%]	RMSE [W/m²]	R²
Proposto	5.57	17.7	0.994
Mellit et al., 2013	-	-	0.967
Kaushika et al., 2014	-	14.5	-

Dall'analisi dei risultati riportati è possibile osservare come i modelli alle reti neurali sviluppati rappresentano un ottimo strumento per la valutazione della radiazione incidente. Per questo motivo, essi costituiscono un modello importante per la valutazione dei sistemi a concentrazione. È, inoltre, importante notare come per la realizzazione di tali modelli sia stata fondamentale l'impiego di valori sperimentali.

6.3. Risultati preliminari della modellazione teorica

La prima fase di analisi della producibilità di un sistema a concentrazione ha riguardato una valutazione principalmente teorica, che si basa sui modelli esposti nel Capitolo 4. In questo senso, l'obiettivo è quello di studiare in maniera generale il comportamento del sistema, prescindendo da uno specifico prototipo e lasciando libere quante più variabili possibili, al fine di osservarne l'incidenza sulle prestazioni. Come definito nel Capitolo 4, si è comunque stabilito un range di scelte preliminari per il sistema a concentrazione. Nello specifico, il sistema di cui si mostrano i risultati teorici prevede principalmente una configurazione point – focus. Il sistema, inoltre, considera sia ottiche riflettive che rifrattive e provvede al recupero del calore facendo scorrere il fluido termovettore in tubi posizionati sotto le celle a tripla giunzione. Le principali variabili di simulazione sono:

- Tipologia di ottica;
- Fattore di concentrazione;
- Numero di celle;
- Località d'installazione;
- Radiazione incidente.

In questa fase, quindi, pur prevedendo uno schema di tipo point – focus, come mostrato in Figura VI.12, si lascia grande variabilità al sistema, considerando numero di celle e fattore di concentrazione variabili in un range molto ampio. Si può osservare come il sistema sia estendibile, aumentando il numero di celle ed il numero di moduli. Inoltre, al variare della concentrazione, lo spazio occupato dall'ottica cambia e ciò porta a

dimensioni variabili. I modelli teorici analizzati, vengono simulati su un orizzonte temporale annuale quindi, inizialmente, si impiega come input al sistema la radiazione diretta incidente media annua che, a seconda della località, viene calcolata con il modello di equazioni illustrato.

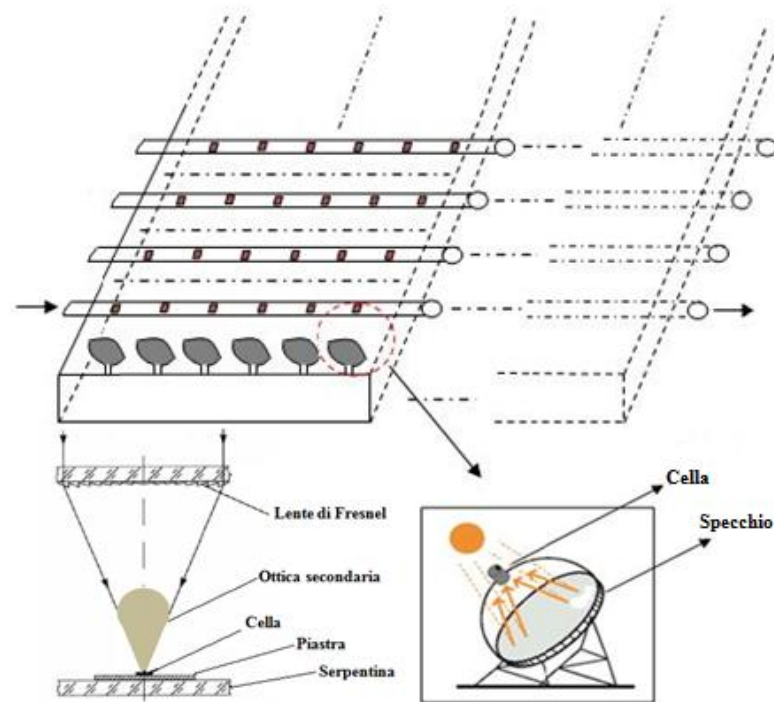


Figura VI.12 Schema base per i modelli teorici

In questa sezione quindi riportiamo, di volta in volta a seconda delle ipotesi fatte, i risultati ottenuti dall'analisi teorica preliminare che riguardano:

- Comportamento della cella;
- Producibilità elettrica;
- Prestazioni termiche.

L'ultimo aspetto della modellazione teorica riguarda l'analisi delle prestazioni impiegando come input la radiazione diretta oraria tramite le previsioni ottenute con le reti neurali.

6.3.1. Risultati teorici del funzionamento della cella

La cella a tripla giunzione costituisce il punto cardine del sistema a concentrazione in quanto rappresenta il motore sia per la parte elettrica che per quella termica. In questo senso, dal punto di vista teorico, le analisi più

Capitolo 6

interessanti riguardano il suo rendimento e la sua temperatura. Come visto, in entrambi i casi, si è reso necessario, in un secondo momento, l'impiego di analisi sperimentali per una valutazione più accurata di tali parametri. L'analisi teorica del comportamento della cella valuta inizialmente la sua temperatura. In Figura VI.13 è mostrato, secondo le equazioni IV.14 – IV.16, l'andamento della temperatura al variare della concentrazione. In questo caso, si è tenuto conto di una temperatura ambiente di circa 20°C. Si può osservare come, per fattori elevati, la temperatura può teoricamente superare i 100°C, pertanto, un raffreddamento attivo è fondamentale per ottenere energia termica ma, soprattutto, per evitare la rottura delle stesse.

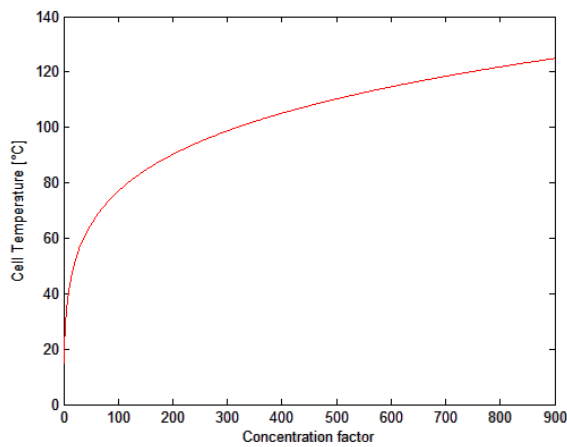


Figura VI.13 Andamento teorico della T cella in funzione di C

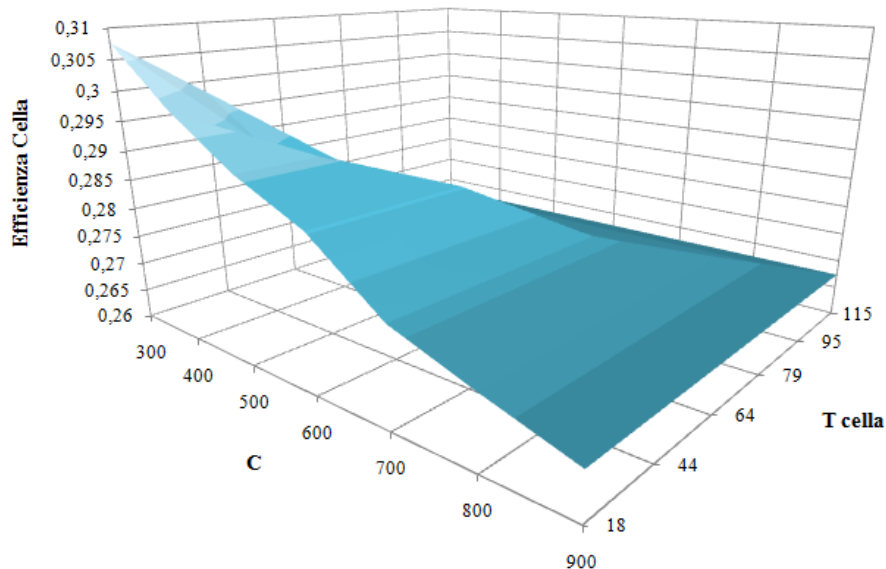


Figura VI.14 Rendimento teorico della cella in funzione di T cella e C

In Figura VI.14 si può, infine, osservare l'andamento teorico del rendimento della cella in funzione del fattore di concentrazione e della temperatura. In questo caso, sono analizzati alti valori di C e, soprattutto, ha forte incidenza l'aumento delle temperature.

L'analisi teorico – sperimentale permette di affinare tali valutazioni in modo da aumentare l'accuratezza dei risultati.

6.3.2. Risultati del modello elettrico teorico

Una prima valutazione della producibilità elettrica di un sistema a concentrazione, come visto nel modello teorico, presentato nel Capitolo 4, prevede la definizione del tipo di ottica, del fattore di concentrazione e del numero di celle. In questa fase, tutti i risultati sono stati parametrizzati in funzioni di tali variabili. In particolare, al fine di calcolare la producibilità elettrica per differenti località, sono state quella di radiazione incidente uniforme nella giornata e di perdite per errato inseguimento nulle.

In Figura VI.15, innanzitutto, considerando 90 celle per il modulo a concentrazione si può osservare l'energia elettrica annuale, per Salerno, ottenuta al variare dell'ottica.

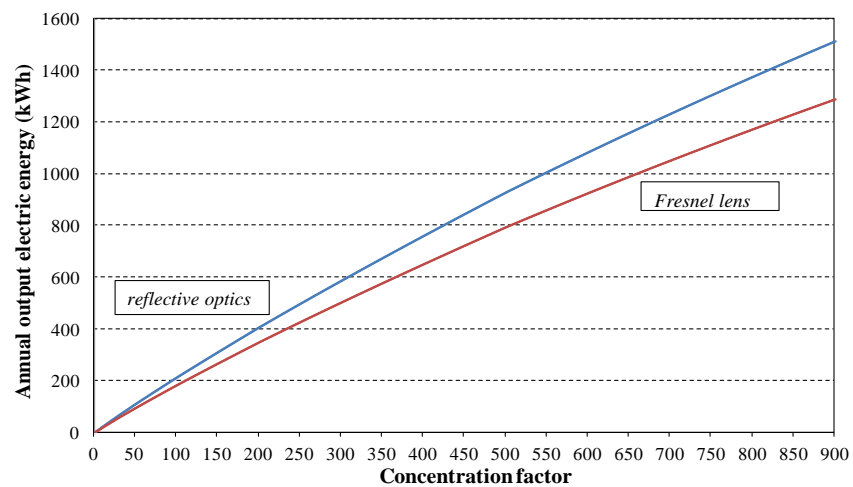


Figura VI.15 Output elettrico annuale in funzione dell'ottica

L'impiego di ottiche riflettive porta in media un aumento del 10% nella producibilità, in quanto si evitano perdite per aberrazione cromatica (Renno e Petito, 2013). Sfruttando un'ottica riflettiva, in Figura VI.16 si può osservare l'output elettrico per Salerno al variare di C e considerando un numero di celle tra 1 e 120 (Renno e Petito, 2015). Nei grafici in Figura VI.17, invece, si mostra il confronto tra un'installazione in Sud Italia ed una nel Nord, in funzione di un fattore C , variabile tra 600 e 900, e di un numero di celle compreso tra 60 e 120.

Capitolo 6

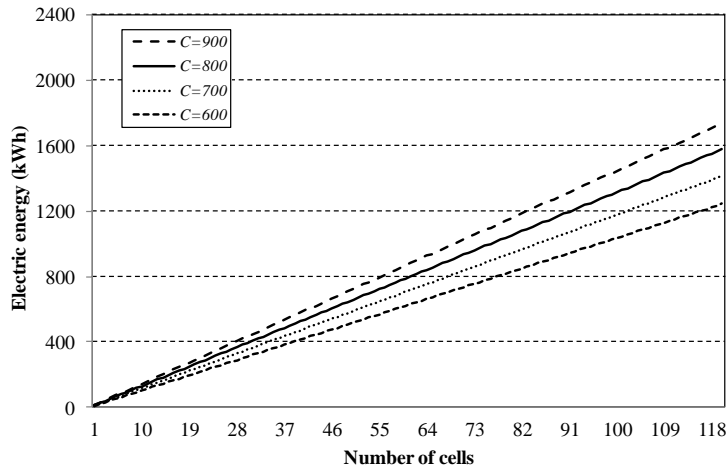


Figura VI.16 Output elettrico per Salerno in funzione di C e numero celle

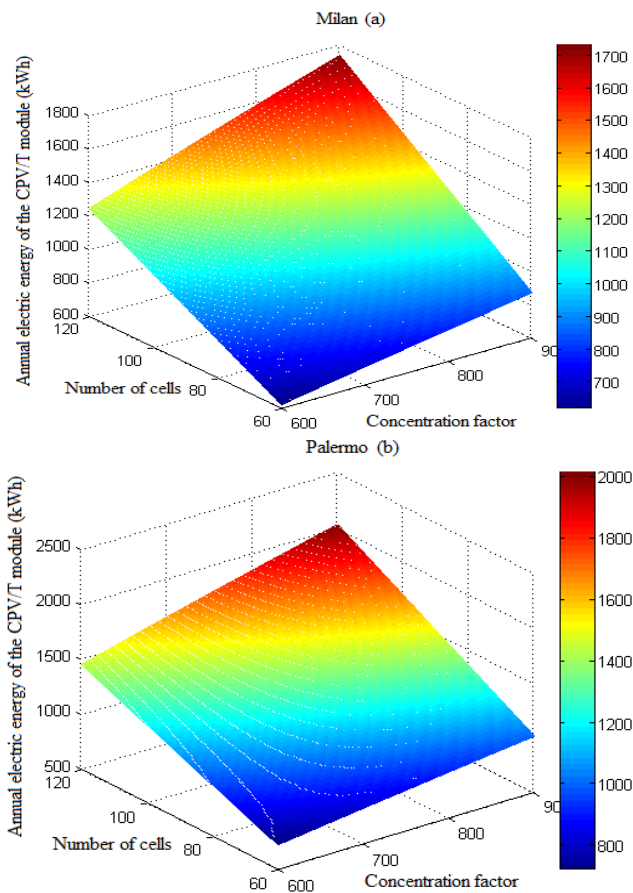


Figura VI.17 Energia elettrica annuale: (a) Nord Italia, (b) Sud Italia

In generale, quindi, si può osservare come, l'output sia fortemente condizionato, oltre che dagli aspetti legati alla sistema (C, numero di celle), anche dalla radiazione incidente. Infatti, in media, la radiazione incidente al Nord (Milano), è stata considerata in circa 1450 kWh/m^2 annui, mentre al Sud (Palermo) in circa 1750 kWh/m^2 . In particolare, la radiazione media diretta media incidente, calcolata per Salerno è stata circa di 1650 kWh/m^2 .

L'ultima analisi legata al modello elettrico teorico, riguarda l'andamento del rendimento elettrico complessivo del sistema a concentrazione. In Figura VI.18 viene mostrato l'andamento del rendimento elettrico del sistema nei vari mesi in funzione di C. In particolare si considera un impianto con 90 celle installato a Salerno.

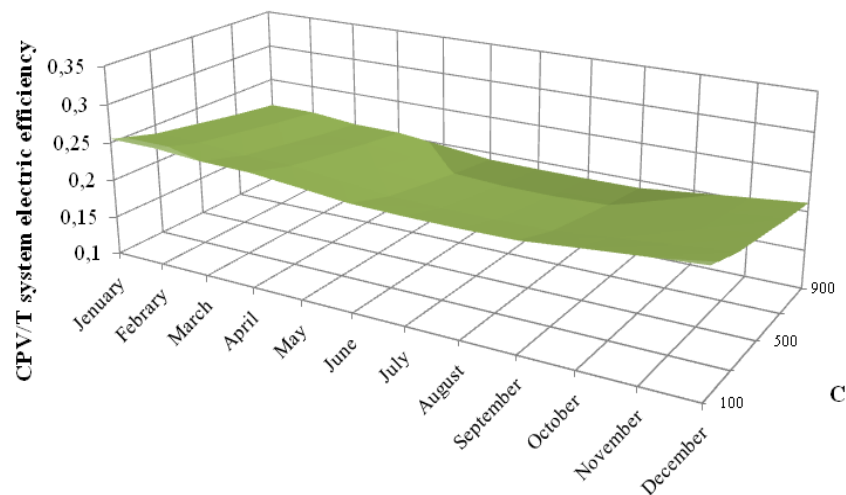


Figura VI.18 Rendimento elettrico teorico del CPV/T

Il sistema CPV/T presenta un rendimento medio inferiore rispetto alla cella, in quanto deve tener conto della connessione in serie delle celle e del rendimento dell'inverter. L'analisi presentata, seppur con alcuni limiti, rende chiare le potenzialità del sistema CPV/T. In questo senso, i risultati dello studio sperimentale consentono una definitiva validazione del sistema.

6.3.3. Risultati del modello termico teorico

La valutazione teorica delle prestazioni termiche del sistema CPV/T permette, come quella elettrica, una caratterizzazione generale delle potenzialità del sistema. In questa fase, l'obiettivo è quello di fornire una prima risposta, in termini di output termico, in funzione delle differenti variabili di processo. Si comprende, fin da ora, come solo a valle di una valutazione teorico – sperimentale, che comprende un'accurata analisi della

Capitolo 6

temperatura delle celle, si possa fornire una valutazione effettiva della producibilità termica del sistema. In questa sezione, le principali variabili monitorate sono l'energia termica media annuale producibile e la temperatura del fluido termo – vettore in uscita.

Riprendendo lo schema di Figura IV.12, oppure quello analogo di Figura VI.12, le prestazioni del sistema sono ottenute al variare di concentrazione e numero di celle. In particolare, le ipotesi di questo modello prevedevano regime stazionario e temperatura del tubo ricevitore, posto sotto le celle, uniforme. Tenendo conto delle equazioni IV-35 – IV.42, e considerando la radiazione media annua incidente su Salerno, in Figura VI.19 si può osservare l'energia termica prodotta in funzione del fattore di concentrazione e del numero di celle (Renno e Petito, 2015).

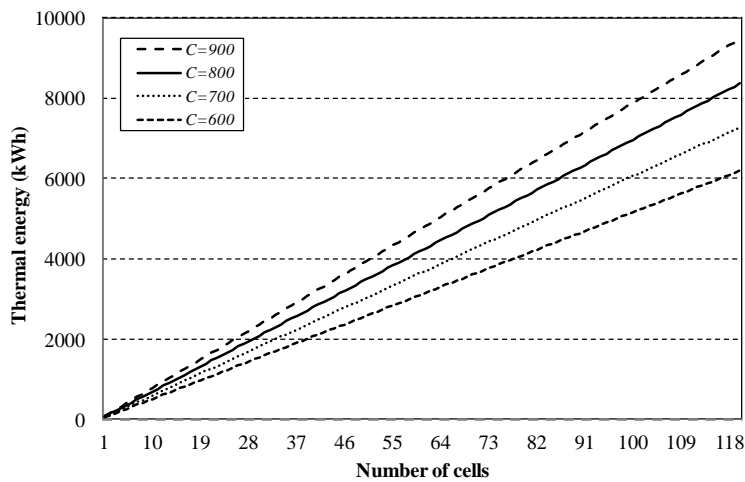
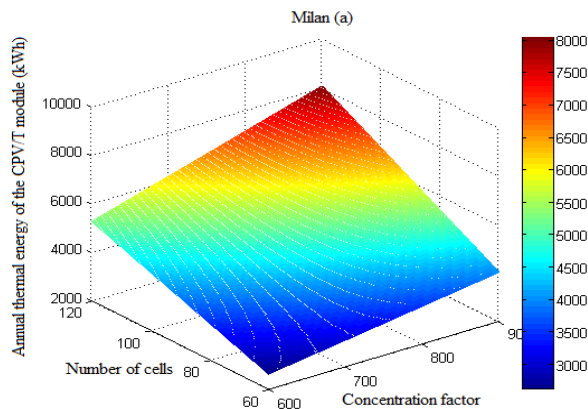


Figura VI.19 Output termico per Salerno in funzione di C e numero celle

Un'analisi complementare viene fornita nei grafici in Figura VI.20, dove in questo caso si confrontano le prestazioni al variare della località: (a) Nord, (b) Sud Italia.



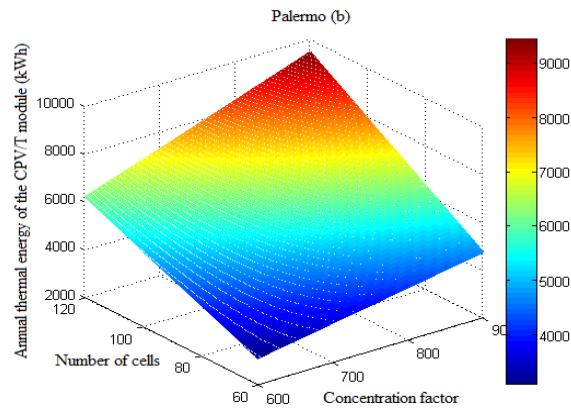


Figura VI.20 Energia termica annuale: (a) Nord Italia, (b) Sud Italia

Si può osservare come, in entrambi i casi, il numero di celle sia stato variato tra 60 e 120, mentre il fattore di concentrazione considerato risulta sempre molto alto. In Figura VI.21, considerando un orizzonte giornaliero, si può stimare la potenza termica erogata, ora per ora, confrontata con quella ideale. In questo caso, tale simulazione teorica ha considerato un modulo da 90 celle con ottica riflessiva (Renno e Petito, 2013).

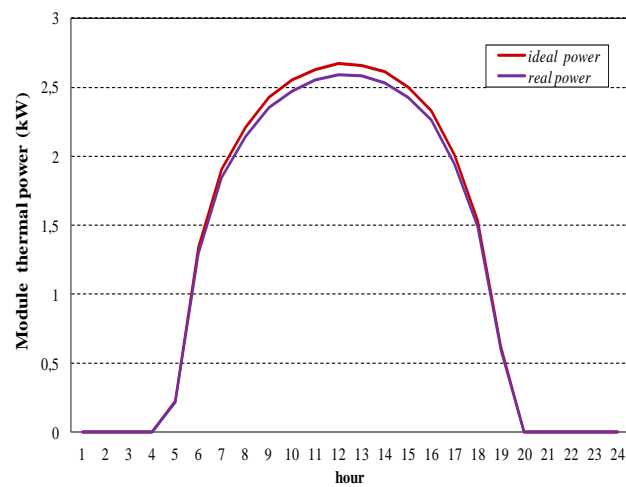


Figura VI.21 Potenza termica teorica giornaliera

Infine, l'ultimo aspetto saliente della fase di analisi termica teorica riguarda la temperatura di uscita del fluido termo – vettore, nelle ipotesi di circuito presentate. In particolare, in Figura VI.22, si può osservare la temperatura di uscita ideale media in funzione del fattore di concentrazione. In Figura VI.23, viene presentato un caso di modello reale, in cui si mostra la temperatura di uscita giornaliera in funzione del numero di celle. In questo

Capitolo 6

caso si è considerata una giornata tipica estiva per Salerno, con un fattore di concentrazione ideale di 800 (Renno e Petito, 2015)

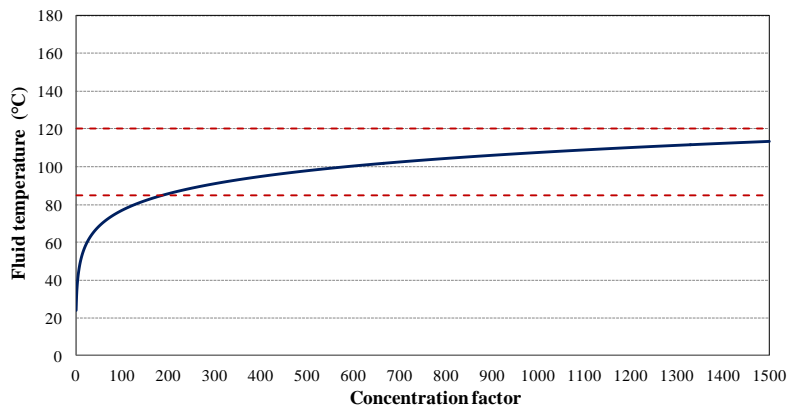


Figura VI.22 *Temperatura ideale di uscita del fluido in funzione di C*

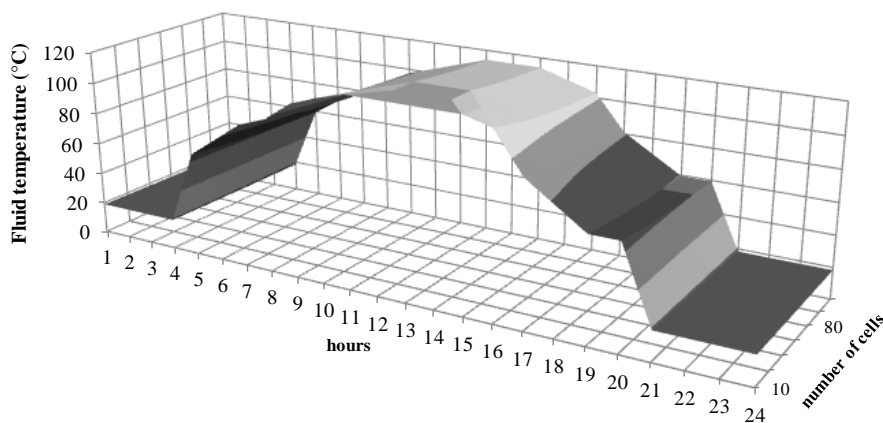


Figura VI.23 *Temperatura teorica del fluido per una giornata estiva*

Come si può notare, teoricamente il fluido potrebbe superare i 90°C, considerando un elevato fattore di concentrazione. Tuttavia, anche per il modello termico teorico, seppur siano mostrate ottime potenzialità, le analisi vanno accurate sfruttando misure sperimentali.

6.3.4. Previsioni di producibilità attraverso le reti neurali

L'integrazione di differenti modelli conduce a stime di producibilità più accurate. In questa sezione, accoppiando i modelli teorici di producibilità con le potenzialità predittive delle reti neurali per la DNI oraria, si mostra una prima analisi delle capacità del sistema a concentrazione, più pertinente

in merito alle condizioni reali di input. In particolare, a partire dalle simulazioni inerenti la radiazione diretta incidente per Salerno, mostrate nei paragrafi precedenti, nei grafici di Figura VI.24, si può osservare la producibilità giornaliera elettrica e termica in funzione della concentrazione. In questo caso, si è considerata una configurazione point – focus che impiega 20 celle.

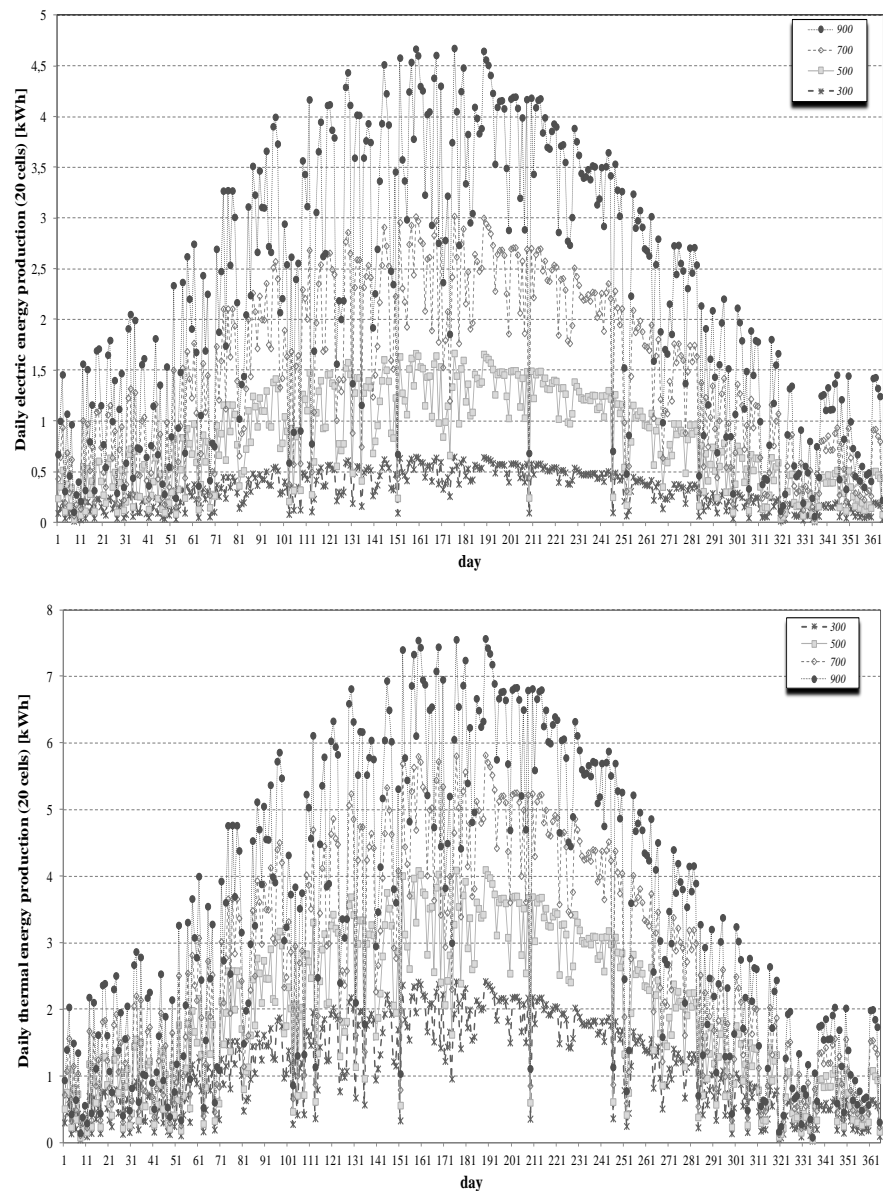


Figura VI.24 Energia giornaliera tramite ANN (a) elettrica; (b) termica

Capitolo 6

L'aumento nella produzione di energia è del 59% e 69% rispettivamente per la parte termica ed elettrica, con V che passa da 300 a 500. Mentre variando C tra 700 e 900, l'aumento di produzione elettrica e termica scende rispettivamente al 23% e 30%. L'impiego delle reti neurali, accoppiate ai modelli teorici, permette di valutare anche la variabilità oraria della potenza erogata. In particolare, nei grafici in Figura VI.25, si può notare la potenza elettrica e termica oraria per un giorno Invernale (Gennaio) a Salerno, considerando un sistema con 60 celle ed un fattore C di 800. La potenza delle reti neurali permette di valutare differenti condizioni climatiche: nuvoloso, parzialmente nuvoloso e soleggiato. La stessa analisi è presentata nei grafici di Figura VI.26. In questo caso, facendo riferimento alla stessa configurazione del sistema, si considerano le prestazioni, in termini di potenza, per una giornata estiva (Luglio) (Renno et al., 2015).

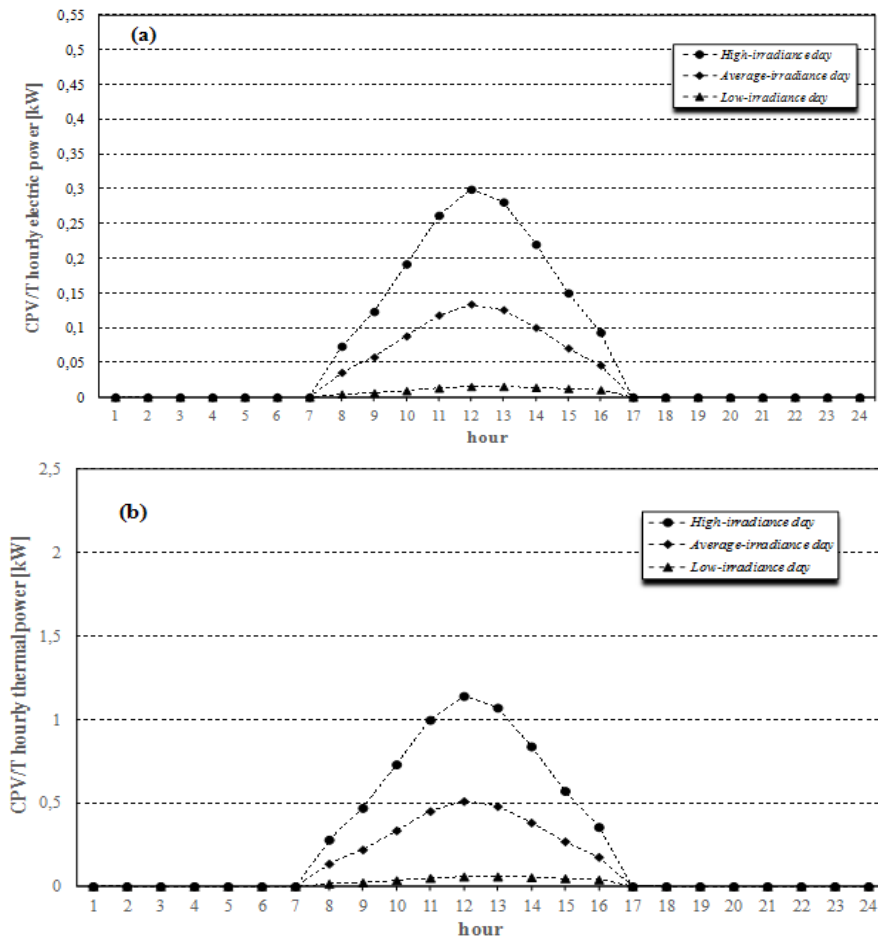


Figura VI.25 Potenza giornaliera invernale del CPV/T in funzione della nuvolosità (a) elettrica; (b) termica

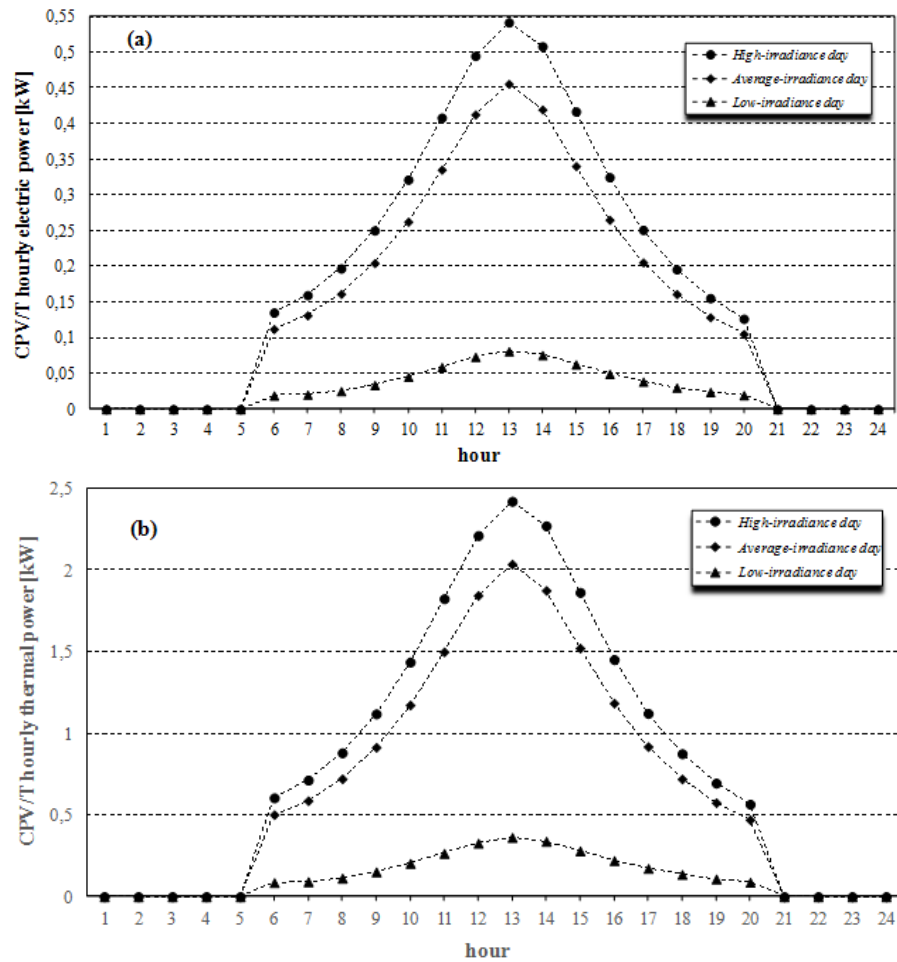


Figura VI.26 Potenza giornaliera estiva del CPV/T in funzione della nuvolosità (a) elettrica; (b) termica

Nel peggiore dei casi (giorno invernale nuvoloso), l'energia elettrica e termica prodotte sono rispettivamente circa 0.11 kWh e 0.39 kWh. Nel migliore dei casi (giorno estivo soleggiato), invece, si ha un'energia elettrica pari a 4.51 kWh ed una termica pari a 20.07 kWh. Tale analisi, vista la grande variabilità osservata, conferma, ancora una volta, che affinando gli strumenti di analisi, si ottengono risultati più precisi per la valutazione complessiva del sistema a concentrazione. In questo senso, conoscere la variazione dell'energia termica ed elettrica ottenibile è fondamentale per dimensionare il sistema CPV/T.

In Figura VI.27 si può osservare, come esempio, la variabilità dell'energia elettrica prodotta dal sistema. In particolare, sono riportati i valori di energia elettrica media giornaliera. Il trend di producibilità è incluso nel range della deviazione standard (σ). In questo senso, la curva

Capitolo 6

superiore rappresenta $\mu+\sigma$ mentre la curva inferiore è $\mu-\sigma$, con μ che rappresenta la media della produzione oraria giornaliera. Si può osservare che la deviazione standard è inclusa tra il 34% ed il 56% se confrontata con l'energia elettrica media. In particolare, Marzo e Settembre risultano i mesi con la più alta variabilità, mentre Dicembre presenta la più bassa. Tale analisi rappresenta un ottimo strumento per la valutazione del CPV/T a partire da modelli di previsione come le reti neurali. Inoltre, dimostra come solo attraverso l'analisi sperimentale la valutazione possa dirsi completa.

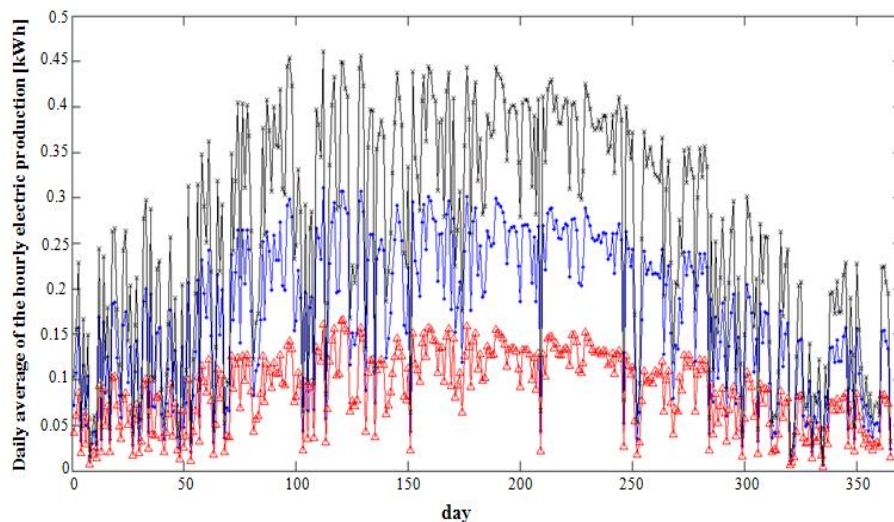


Figura VI.27 Variabilità media giornaliera della produzione di energia elettrica

6.4. Risultati sperimentali

In questa sezione sono riportati i principali risultati delle campagne sperimentali effettuate, sfruttando il prototipo realizzato ed il sistema di monitoraggio/acquisizione configurato. Nello specifico, oltre alle prove effettuate si mostrano i risultati riferiti alle varie caratterizzazioni sperimentali, alle procedure di valutazione del fattore di concentrazione ed al monitoraggio delle prestazioni elettriche in termini di rendimento e producibilità. In particolare, i risultati presentati fanno riferimento alle due campagne di prove descritte nel paragrafo 5.5.2., considerando le varie analisi presentate.

Il punto cardine della parte sperimentale, oltre che nelle strumentazioni predisposte, risiede nelle configurazioni analizzate in Figura V.10:

- Configurazione 1: solo cella a tripla giunzione;
- Configurazione 2: cella + caleidoscopio;

- Configurazione 3: sistema completo (cella + lente di Fresnel + caleidoscopio);
- Configurazione 4: cella + lente di Fresnel.

Tutte le analisi ed i risultati, infatti, si basano sulla distinzione di tali schemi per l'impianto sperimentale realizzato.

6.4.1. Caratterizzazione a concentrazione costante

Il prototipo realizzato, come detto, consente di modificare la distanza focale variando l'altezza della lente e, quindi, di variare la concentrazione. La prima analisi riguarda la caratterizzazione della cella mantenendo l'altezza della lente fissa. In particolare, durante la prima campagna sperimentale, l'altezza della lente che sembrava consentisse la concentrazione maggiore, in base alla focalizzazione dei raggi solari sul fuoco, era stata fissata a 23 cm. Solo l'analisi successiva durante la seconda campagna sperimentale, ha consentito di raggiungere livelli di concentrazione maggiori.

Impiegando la SMU descritta nel Capitolo 5, che quindi impone una tensione variabile e legge i valori corrispondenti di corrente, e considerando una radiazione incidente di circa 920 W/m^2 , si è caratterizzata la cella nelle varie configurazioni. In Tabella VI.6 sono riportati i valori caratteristici di tensione di circuito aperto (V_{oc}), corrente di corto circuito (I_{sc}), tensione e corrente nel punto di massima potenza (V_{MPP} , I_{MPP}) (Renno e Petito, 2016).

Tabella VI.6 Valori caratteristici prima caratterizzazione

Configurazione	V_{oc} [V]	I_{sc} [A]	V_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]
1 solo cella	2.58	0.00477	-	-
2 caleidoscopio	2.62	0.0312	-	-
3 sistema intero	3.05	0.9951	2.45	0.759

Sfruttando tali dati e considerando la procedura sperimentale di valutazione del fattore di concentrazione in funzione delle correnti di corto circuito, descritta nel paragrafo 5.6.1., otteniamo il primo valore di concentrazione per il prototipo sperimentale. Nello specifico per il sistema completo si ottiene una concentrazione di 208, per il solo caleidoscopio si ha un valore di 6.54, mentre il fattore intermedio C_{int} , tra lente e caleidoscopio è di 31.9.

In Figura VI.28 è riportata la caratteristica $I - V$ per le tre configurazioni. In questo senso, intendiamo concentrazione costante, in quanto, in seguito, mostreremo la caratteristica $I - V$ al variare delle concentrazioni.

Capitolo 6

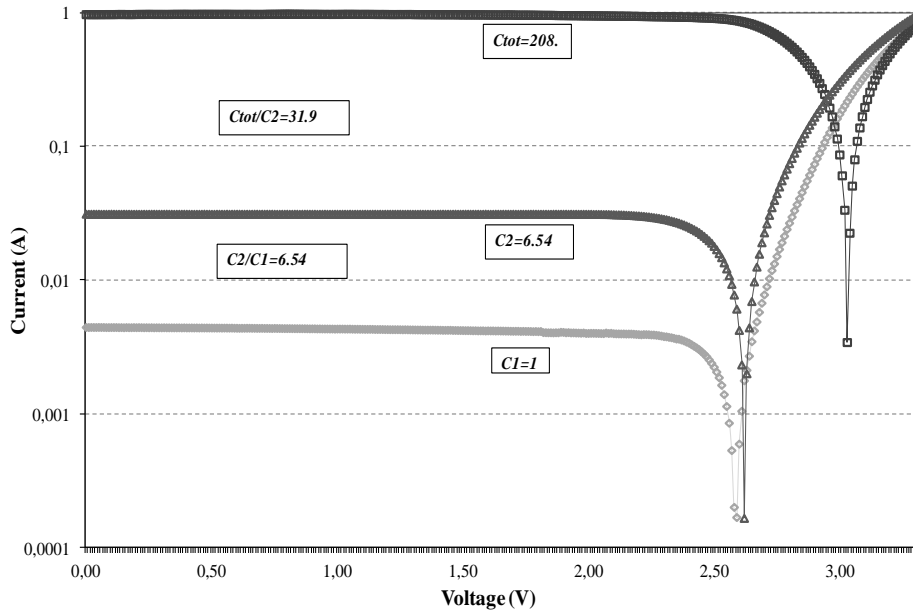


Figura VI.28 Caratteristica $I - V$ per la prima caratterizzazione

In questa fase, considerando la configurazione con la sola lente, si è ottenuto, fissando sempre l'altezza a 23 cm, un valore di concentrazione maggiore intorno a 230, come riportato nella caratteristica $I - V$ di Figura VI.29.

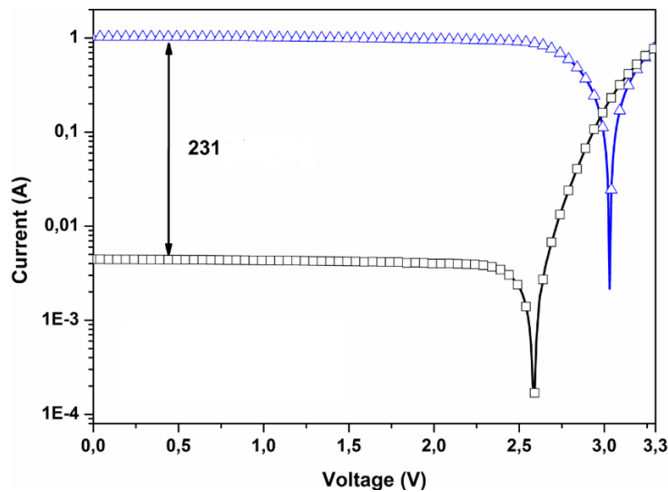


Figura VI.29 Caratteristica $I - V$ per la configurazione 4

Come vedremo, seppur in questa prima fase conduca ad un valore di concentrazione maggiore, tale configurazione porta a maggiori problemi in termini di inseguimento.

6.4.2. Risultati principali della prima campagna sperimentale

Una volta caratterizzata a concentrazione costante la cella a tripla giunzione, durante la prima campagna sperimentale sono state svolte una serie di misure al fine di valutare:

- Parametri in funzione del carico elettrico;
- Parametri in funzione della radiazione;
- Parametri in funzione della configurazione;
- Perdite di producibilità per mancato inseguimento.

Tutte le misure, monitorate con un intervallo di campionamento di 15 secondi, sono state mediate sul minuto.

6.4.2.1. Parametri in funzione del carico elettrico

In questa fase, sono state monitorate la tensione e la corrente della cella durante il funzionamento, considerando due valori di resistenza elettrica in serie: 3.5 Ω e 5.5 Ω .

In Figura VI.30 è possibile osservare la tensione della cella in un'ora, caratterizzata da una radiazione diretta incidente di 870 W/m^2 , in diverse giornate con diversi valori di resistenza.

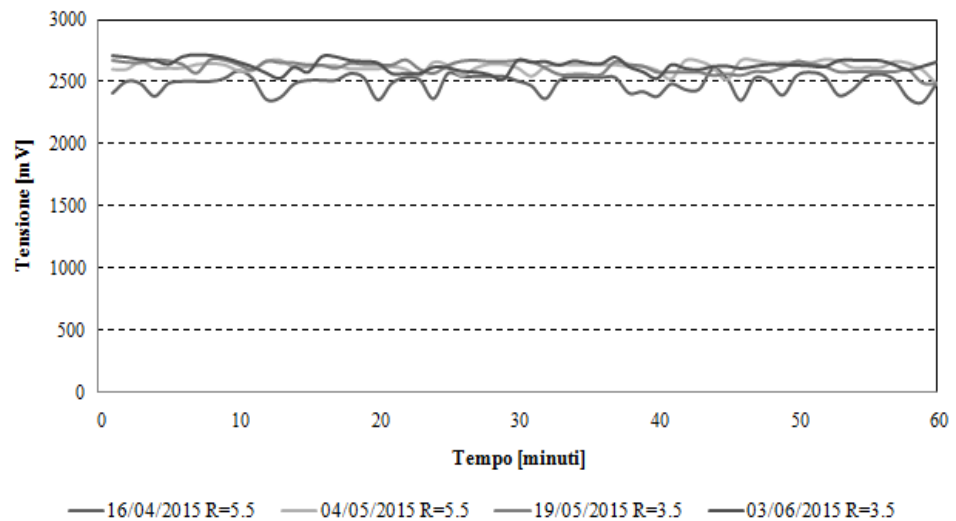


Figura VI.30 Tensione sperimentale in funzione del carico

In Figura VI.31 è riportata la corrente osservata nelle stesse condizioni della prova precedente. Come si può osservare, mentre la tensione è insensibile al carico, nel passaggio alla resistenza minore, si ha un aumento

Capitolo 6

di circa il 48% della corrente. Ciò indica che ci avviciniamo al valore di resistenza del punto di massima potenza.

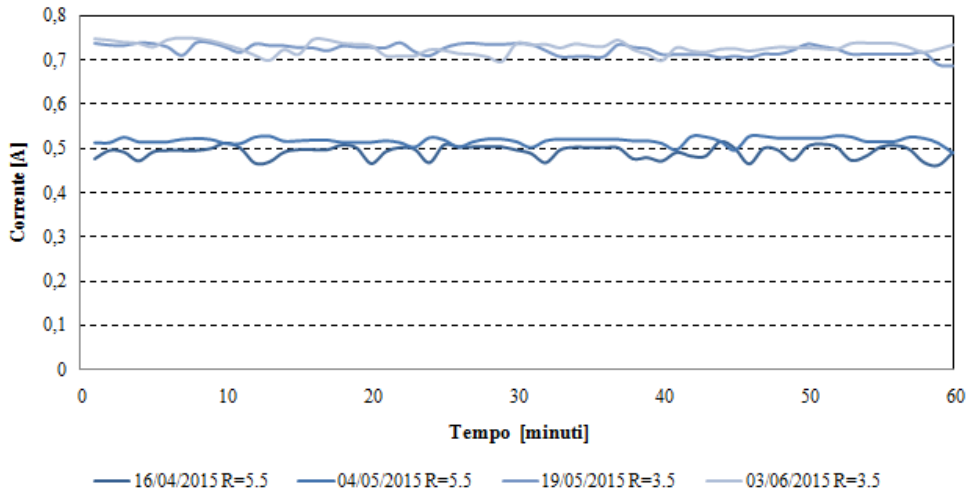


Figura VI.31 Corrente sperimentale in funzione del carico

6.4.2.2. Parametri in funzione della radiazione

In questo caso, le principali misure si riferiscono alla temperatura della cella ed alla corrente foto – generata, al variare della radiazione incidente.

In Figura VI.32 si può osservare la temperatura della cella in due condizioni di radiazione, una con una media giornaliera di circa 860 W/m^2 , l'altra con una media di circa 650 W/m^2 .

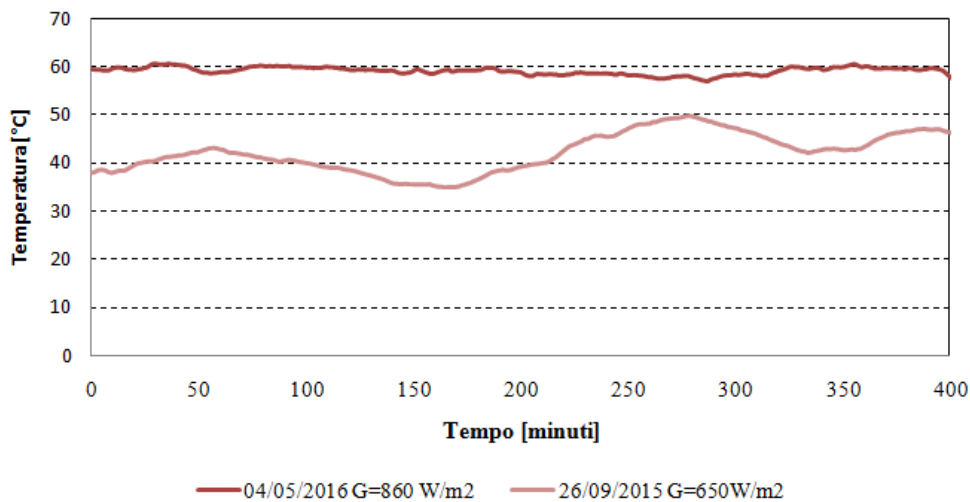


Figura VI.32 Temperatura sperimentale in funzione della radiazione

Da quanto si evince, la radiazione influenza molto la temperatura della cella a parità di concentrazione. In questo caso, tutte le misure sono state raccolte considerando il sistema completo. In Figura VI.33, invece, si può osservare la corrente foto – generata in funzione della radiazione incidente per quattro giornate tipo, caratterizzate da un valore di radiazione variabile.

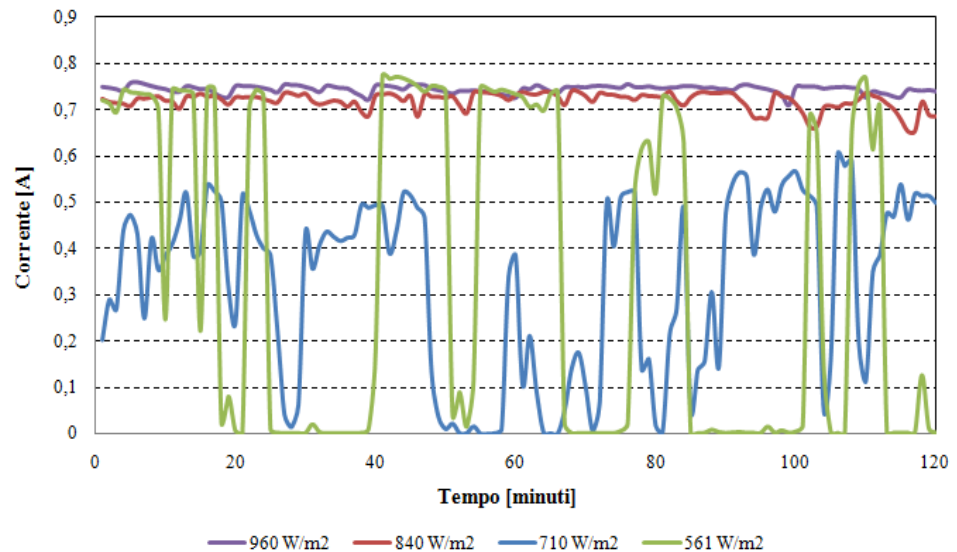


Figura VI.33 Corrente in funzione della radiazione

In questo caso, le prove tengono conto di un intervallo temporale di due ore, mentre i valori di radiazione riportati corrispondono ad una media nel periodo considerato. Anche in questo caso, si può osservare la forte incidenza della radiazione, che conferma la necessità di accuratezza nella sua previsione.

6.4.2.3. Parametri in funzione della configurazione

Durante la prima campagna sperimentale, avendo definito differenti configurazioni, si è osservata l'energia elettrica prodotta e la temperatura in funzione dello schema adottato.

In Figura VI.34 si può osservare l'energia prodotta con le quattro configurazioni considerando una prova di circa 7 ore, con analoghe condizioni di radiazione incidente. Si può osservare che, l'energia prodotta con la sola lente di Fresnel risulta maggiore, in quanto permette, come visto in precedenza, almeno in questa prima fase, una concentrazione più alta.

In Figura VI.35, invece, è riportato l'andamento della temperatura della cella, in condizioni simili di radiazione, considerando le tre configurazioni principale. In questo caso, si è mantenuto l'intervallo di campionamento di

Capitolo 6

15 secondi. Si può osservare che, il sistema completo, conduce a temperature maggiori in quanto è maggiore la concentrazione. Questo costituisce una prima prova sperimentale dell'influenza della concentrazione sulla temperatura della cella. Nella seconda campagna sperimentale, tale influenza è stata approfondita ed i risultati sono riportati in seguito.

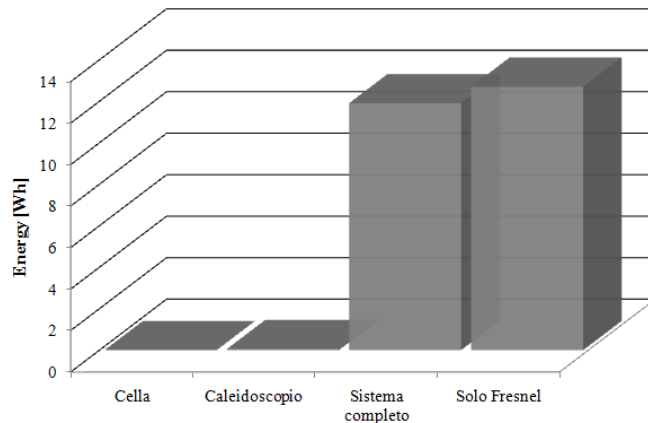


Figura VI.34 Energia durante la prima campagna con le 4 configurazioni

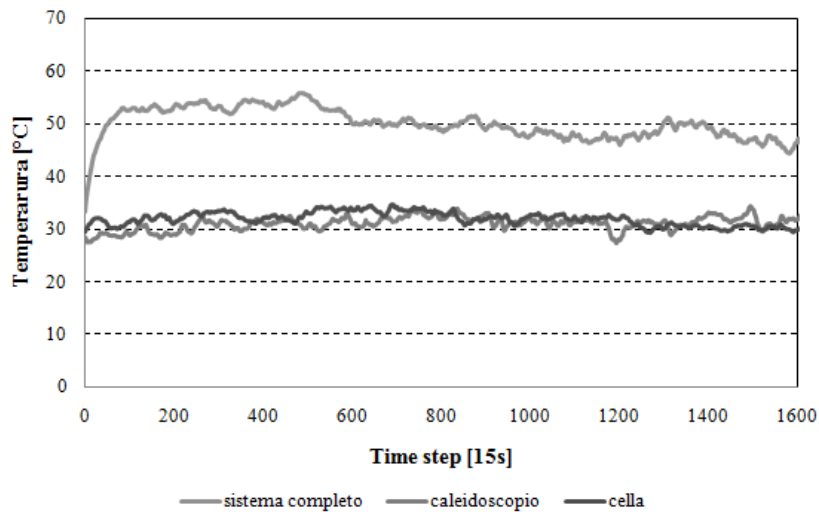


Figura VI.35 Temperatura della cella in funzione della configurazione

6.4.2.4. Perdite per mancato inseguimento

L'ultimo aspetto trattato durante la prima campagna sperimentale ha riguardato l'analisi della producibilità qualora l'inseguitore non funzionasse

correttamente. In particolare, il confronto ha interessato due configurazioni specifiche, la prima con il sistema completo mentre la seconda è riferita alla presenza della sola lente di Fresnel. In questo senso, vista la maggiore producibilità rilevata in precedenza, si vuole osservare durante il funzionamento reale, quindi con un tracker che può avere problemi di puntamento, cosa accade in termini di energia prodotta.

In Figura VI.36 viene mostrata la progressiva riduzione di energia prodotta con le due configurazioni, arrestando l'inseguitore. Si può osservare che in circa 6 minuti il sistema con la sola lente azzera la sua produzione, mentre quello completo impiega 15 minuti.

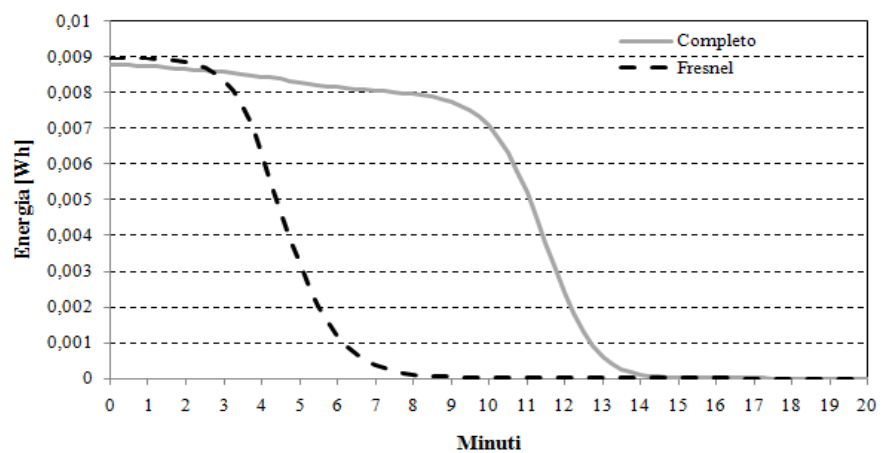


Figura VI.36 Energia con tracker imperfetto

In Figura VI.37, si può osservare la riduzione percentuale dell'energia prodotta.

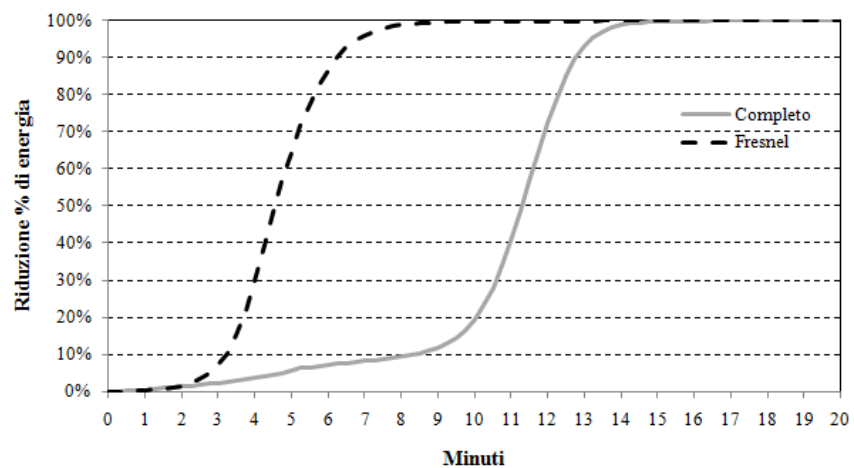


Figura VI.37 Riduzione percentuale per errato inseguimento

Capitolo 6

Come si può osservare dal grafico, dopo soli 4 minuti, il sistema completo ha una riduzione di producibilità del 4%, mentre quello con la sola lente di circa il 20%. Ciò porta a scartare tale configurazione, infatti, si può pensare che con un controllo costante, in pochi minuti, si possa riallineare l'inseguitore per un corretto puntamento. Tuttavia, con tale configurazione, tale opzione viene a decadere poiché in pochi minuti si hanno ingenti riduzioni energetiche.

6.4.3. Caratterizzazione della cella a concentrazione variabile

La caratterizzazione della cella al variare della concentrazione è avvenuta durante la seconda campagna di prove sperimentali. In particolare, l'aspetto saliente in questa seconda fase è legato alla variazione della distanza focale tramite la modifica dell'altezza della lente nella configurazione di sistema completo. Sostanzialmente, sfruttando tale peculiarità del prototipo e la procedura di calcolo sperimentale della concentrazione attraverso le correnti di corto circuito, è stato possibile raggiungere nuovi livelli di concentrazione.

In particolare, considerando una stessa radiazione incidente, circa 930 W/m², si è valutata la corrente di corto circuito per ciascuna altezza. A questo punto, valutando nuovamente, nelle stesse condizioni di radiazione, la I_{sc} della sola cella (0.00435A), si è potuto valutare il fattore di concentrazione in funzione dell'altezza della lente, come riportato in Figura VI.38 (Renno et al., 2017a).

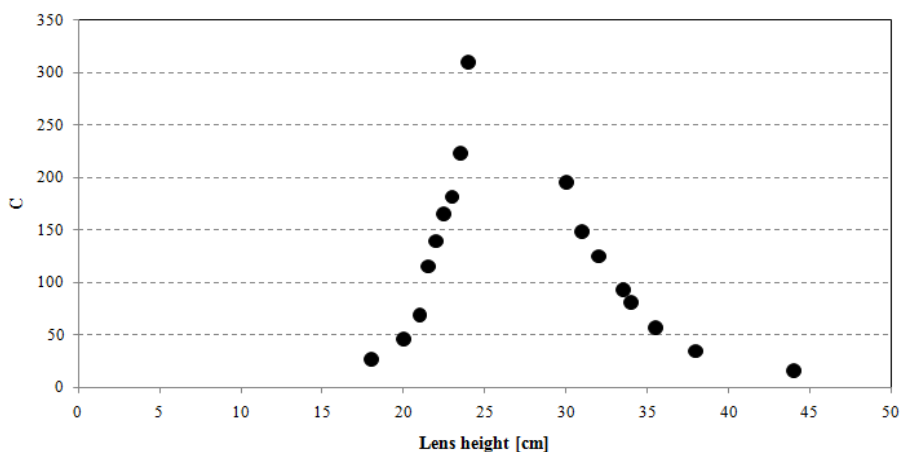


Figura VI.38 Fattore C del prototipo in funzione dell'altezza della lente

Un aumento del valore di h da 18 cm a 24 cm comporta una variazione di C da 16 a 310. Si può notare che, un ulteriore aumento del valore h nell'intervallo tra 30 e 44 cm determina una marcata diminuzione di C .

Ciò significa che il sistema CPV mostra un comportamento simmetrico, centrato intorno ad un valore ottimale di $h=24$ cm che ne consente la

massima concentrazione. A partire da tale valore, si può osservare, in Figura VI.39, la nuova caratteristica I – V delle tre principali configurazioni, con radiazione incidente 930 W/m².

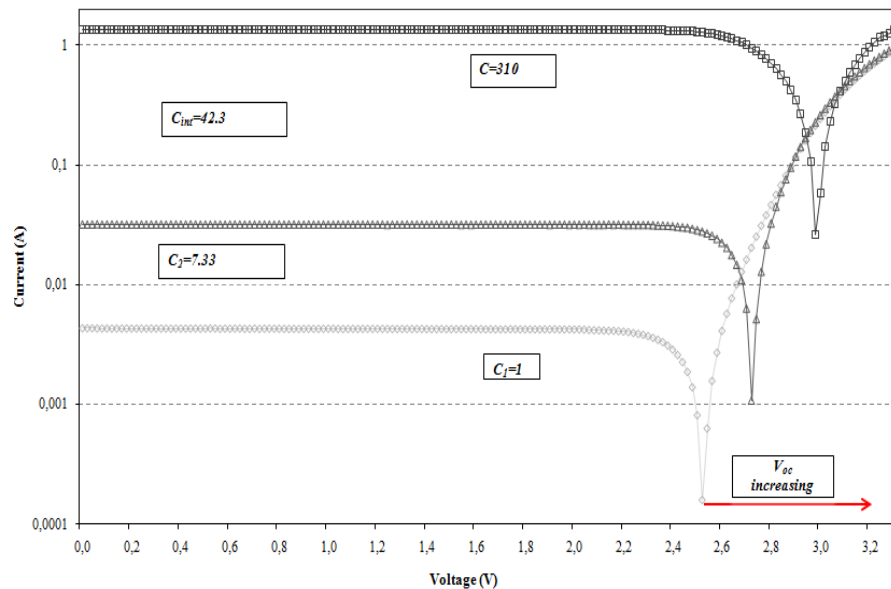


Figura VI.39 Caratteristica I – V del prototipo

Il fattore di concentrazione per la configurazione con il solo caleidoscopio è C₂=7.33, mentre il fattore intermedio tra sistema completo e schema 2 è di 42.3, mentre il valore massimo è 310. In Tabella VI.7 sono riportati i valori di I_{sc}, V_{oc} e C per i tre schemi principali.

Tabella VI.7 Risultati della seconda caratterizzazione

Configurazione	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	Concentrazione
C1 (cella)	2.56	0.00435	1
C2 (caleidoscopio)	2.72	0.0319	7.33
C3 (completo)	3.01	1.35	310

6.4.3.1. Parametri in funzione della concentrazione

Una volta implementata la procedura di valutazione sperimentale di C al variare dell'altezza della lente, è possibile, attraverso la SMU, valutare tutti i parametri che caratterizzano la cella.

Capitolo 6

In particolare, al variare di C , quindi di h , sono stimati I_{sc} , V_{oc} , η , FF , R_s , R_{sh} . In Figura VI.40, sono riportate tutte le caratteristiche $I - V$ della cella InGaP/GaAs/Ge ai vari livelli di concentrazione, definiti con l'altezza della lente (Renno et al., 2017a).

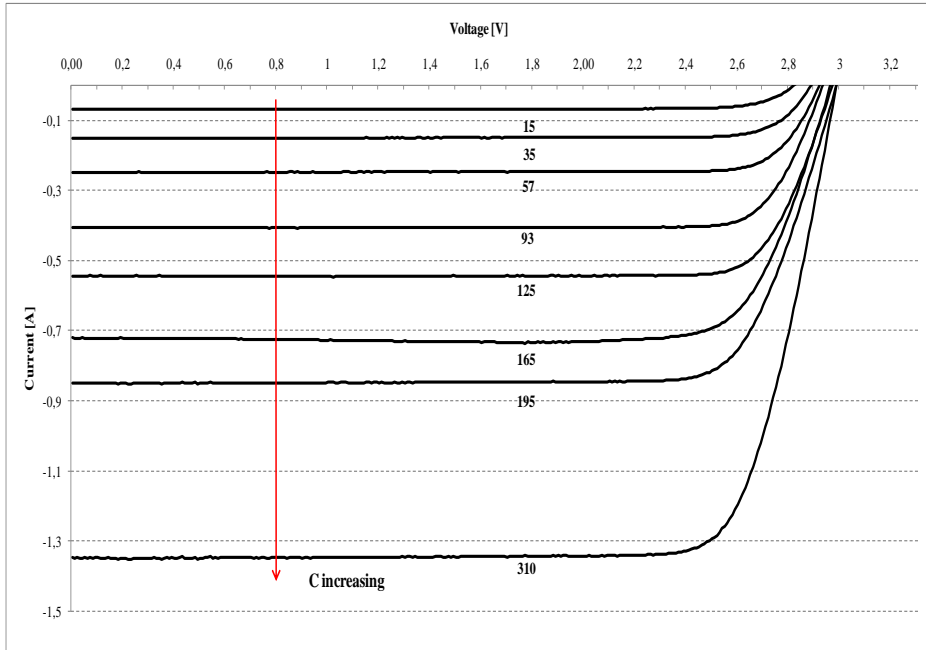
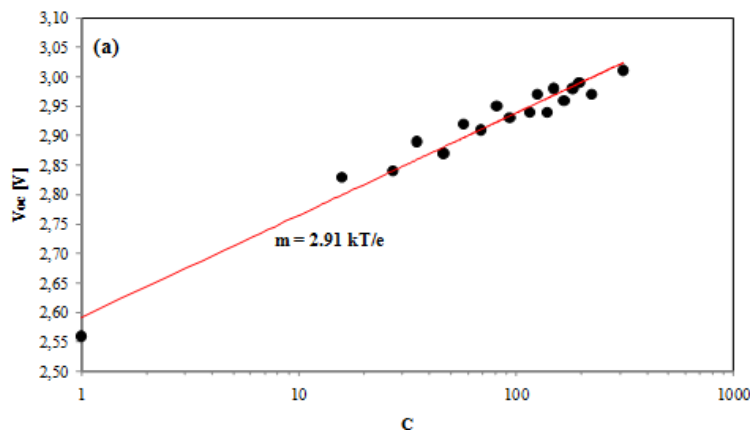


Figura VI.40 Caratteristiche $I - V$ in base alla concentrazione

Sia la I_{sc} che V_{oc} aumentano con la concentrazione. Tale aspetto può essere valutato in maniera più immediata nei grafici di Figura VI.41. La V_{oc} cresce con una dipendenza logaritmica all'aumentare della concentrazione di luce.



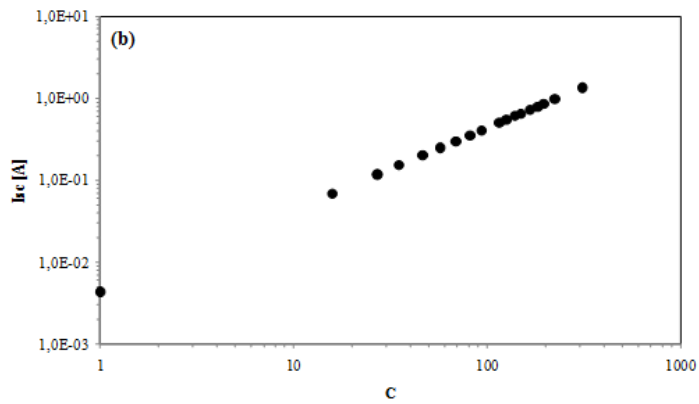
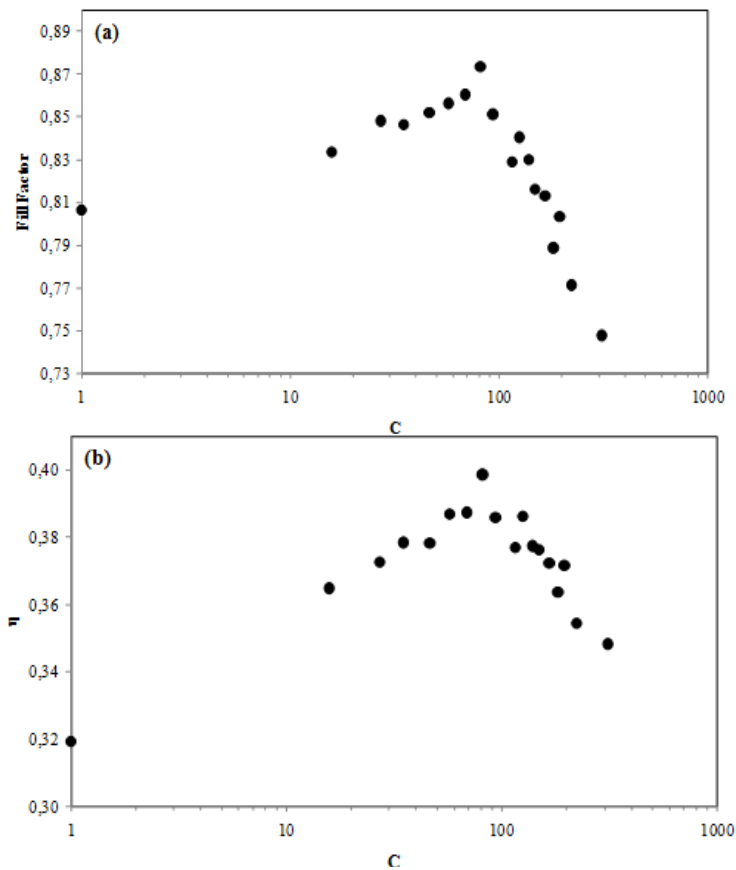


Figura VI.41 Parametri in funzione di C (a) V^{oc} ; (b) I_{sc}

Considerando l'equazione relativa al modello circuitale della cella, il valore di idealità del diodo m pari a 2.91. Tale risultato è in buon accordo con quello trovato in letteratura per una cella a tripla giunzione nello stesso intervallo di concentrazione (Braun et al., 2013).



Capitolo 6

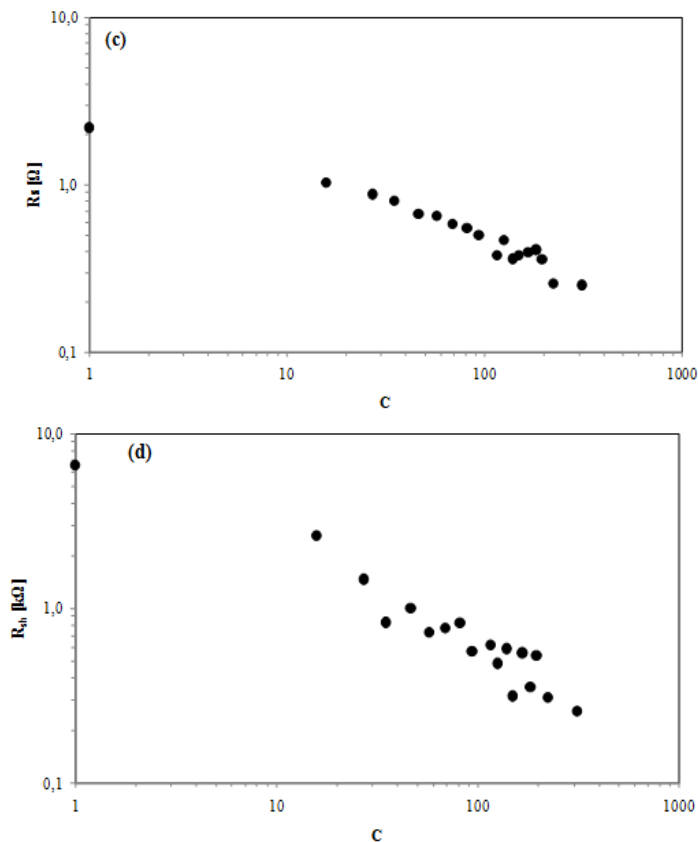


Figura VI.42 Parametri della cella in funzione di C (a) FF ; (b) η_c ; (c) Resistenza serie; (d) Resistenza di shunt

Nei grafici di Figura VI.42 sono riportati tutti gli altri parametri della cella in funzione della concentrazione.

Come riportato in Figura VI.42a, il FF aumenta leggermente con C dal 80% al 87% fino a 81x, in seguito diminuisce raggiungendo un valore del 74% a 310x. Tale effetto influenza anche l'efficienza, infatti, come riportato in Figura VI.42b, il valore del η_c a $C=1$ è 0.32. Aumentando C , il rendimento fino al valore massimo di 0.398 ad 81x, a cui corrisponde anche il valore massimo di FF . Un ulteriore aumento di C provoca una diminuzione dell'efficienza fino al valore di 0.349 a 310x (Renno et al., 2017a).

La riduzione del FF e del η_c può essere correlato alla caduta ohmica dovuta alla resistenza serie (R_s). Come indicato in Figura VI.42c, R_s assume valori compresi tra 2.2 Ω e 0,25 Ω da 1 a 310x. Ad elevati livelli di concentrazione corrisponde una corrente maggiore, pertanto, le perdite dovute alla resistenza serie diventano il fattore principale della diminuzione del rendimento. D'altra parte, la resistenza shunt (R_{sh}), come indicato in

Figura VI.42d, ha un valore di circa $6.6 \text{ k}\Omega$ a $C=1$ e diminuisce all'aumentare di C , con un valore di $259 \text{ }\Omega$ a $310x$.

6.4.4. Elettroluminescenza

Al fine di mostrare la risposta spettrale di ciascuno strato di materiale della cella a tripla giunzione ha disposizione, sono state effettuate delle misure di elettroluminescenza tramite la SMU. Nei grafici di Figura VI.43 è possibile apprezzare gli spettri di elettroluminescenza normalizzata, della cella InGaP/GaAs/Ge, polarizzata ad una corrente costante e misurata nella lunghezza d'onda fra 500 e 2000 nm.

In Figura VI.43a, gli spettri di emissione, relativi alla sottocella superiore ed intermedia, sono collocati tra 884 e 660 nm, rispettivamente, per i materiali InGaP e GaAs, e misurati con una corrente di iniezione di 20 mA. Si riporta anche una foto della cella con un'area attiva di $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$. In particolare, la luce rossa viene emessa dalla strato di InGaP superiore.

Nella Figura VI.43b, la linea continua rappresenta il segnale di elettroluminescenza della cella, polarizzata con una corrente di 50 mA. La generazione della seconda armonica relativa al picco di emissione della parte InGaP e GaAs è combinata con il picco di emissione della cella inferiore producendo un segnale EL più esteso nel range considerato.

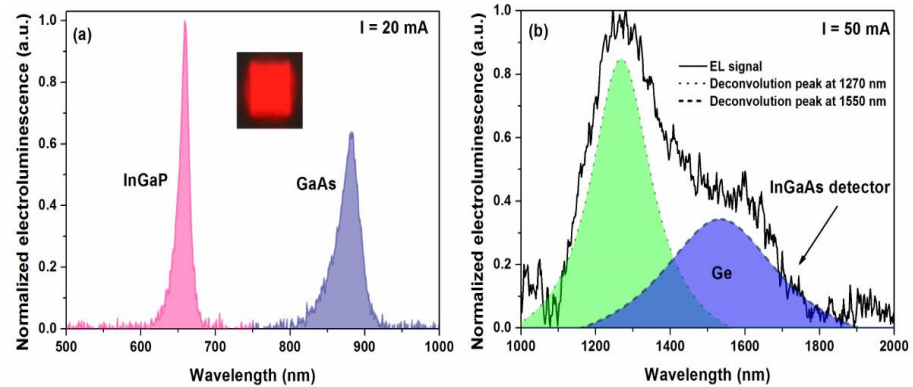


Figura VI.43 Spettro di elettroluminescenza della cella polarizzata con una corrente (a) 20 mA; (b) 50mA

Di conseguenza, è stato necessario applicare una procedura di deconvoluzione al fine di evidenziare il picco di emissione EL dato dal Germanio. In particolare, si nota la presenza di due picchi distinti situati a 1270 e 1550 nm a causa della generazione di una seconda armonica (la prima è in azzurrino) relativa al materiale GaAs e il picco di emissione EL del germanio. A parte il contributo della cella superiore mostrato in Figura

VI.42b con una linea tratteggiata, il segnale EL relativo al Ge si trova a 1550 nm (De Kersauson et al., 2010).

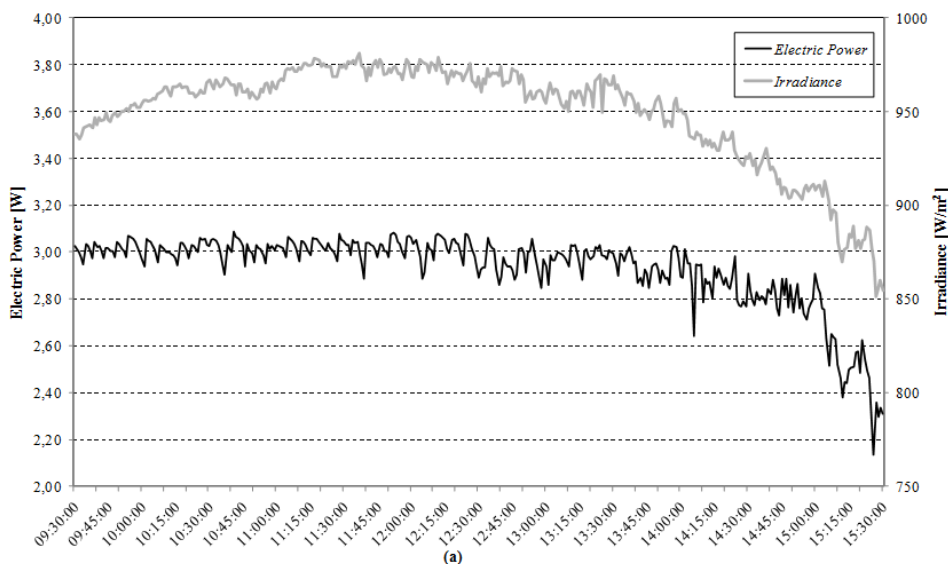
La combinazione dei due picchi di emissione EL dati dal germanio provocano un picco di emissione più ampio situato a 1700 nm.

6.4.5. Altri risultati della seconda campagna sperimentale

Durante la seconda campagna sperimentale, il principale obiettivo è stato valutare il funzionamento del prototipo al variare della concentrazione. In questo senso, una volta definita la massima concentrazione, si sono analizzati alcuni aspetti legati alla potenza elettrica ed al rendimento durante il funzionamento dell'impianto. Infine, si è osservata la temperatura della cella in differenti condizioni, al fine di ottenere misure utili per i modelli teorico – sperimentali.

6.4.5.1. Monitoraggio delle prestazioni elettriche

Il monitoraggio delle prestazioni del prototipo è stato eseguito considerando il sistema completo alla massima concentrazione ($C=310x$), quindi con un'altezza della lente fissata a 24 cm. In particolare sono stati osservate la potenza ed il rendimento elettrico in differenti condizioni di irraggiamento diretto. Nei grafici, in Figura VI.44, è riportata la potenza elettrica monitorata durante una giornata. In Figura VI.44a la prova, svolta tra le 09:30 e le 15:30 con una radiazione media di 930 W/m^2 , riporta una potenza media di 2.95 W.



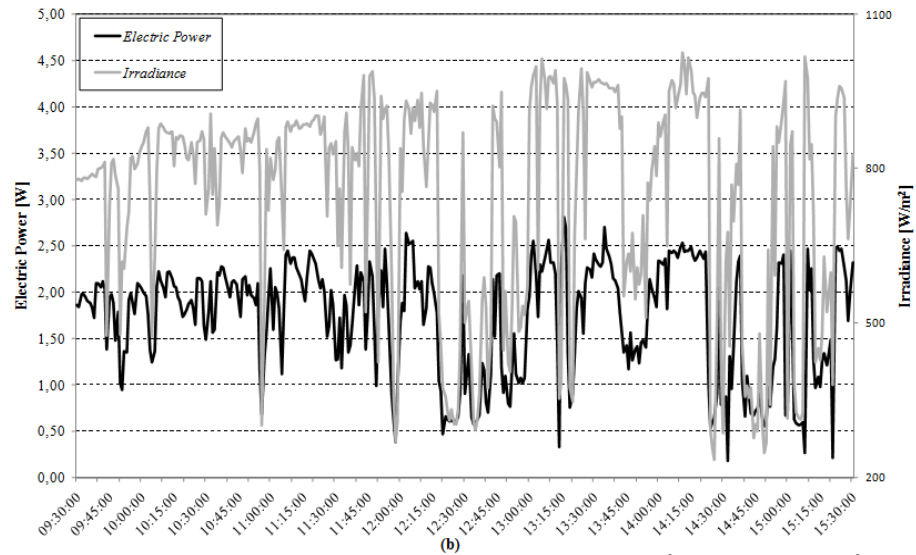


Figura VI.44 Potenza elettrica misurata (a) a 930 W/m^2 ; (b) a 710 W/m^2

In Figura VI.44b, considerando nelle stesse ore una giornata con elevata variabilità, che presenta una radiazione diretta media di 710 W/m^2 , la potenza media misurata di 1.72 W . Considerando le condizioni di lavoro indicate nei grafici precedenti, è stata valutato il rendimento del prototipo, riportato in Figura VI.45 per entrambe le condizioni.

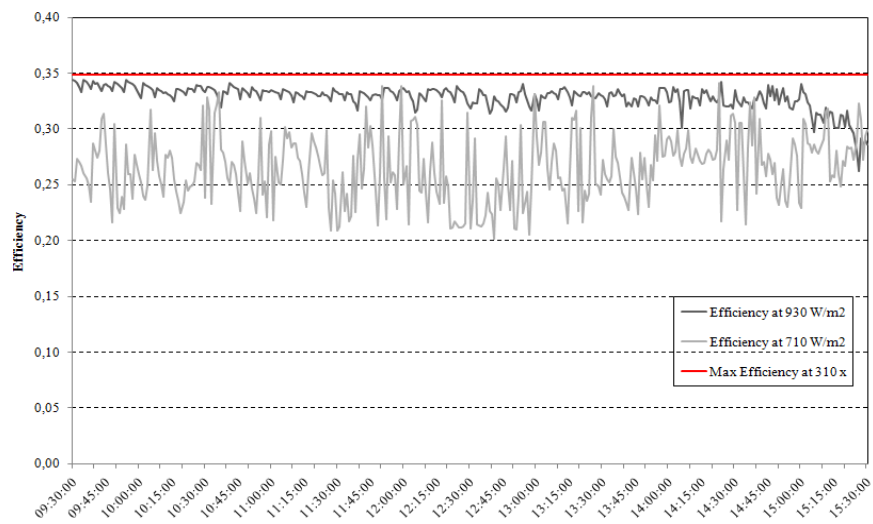


Figura VI.45 Confronto del rendimento elettrico in varie condizioni

Il rendimento medio della cella a 930 W/m^2 è circa il 32.8%, mentre un valore medio di 26.7% si è ottenuto a 710 W/m^2 . Poiché entrambe le prove sono state condotte con un valore C di 310x, si riporta, in Figura, il valore di

Capitolo 6

efficienza massima della cella pari a 34.8%, stimata a tale valore durante la caratterizzazione. Come si può osservare, durante il funzionamento reale, il rendimento medio della cella è inferiore, soprattutto quando la radiazione diretta mostra una grande variabilità (Renno et al., 2017a).

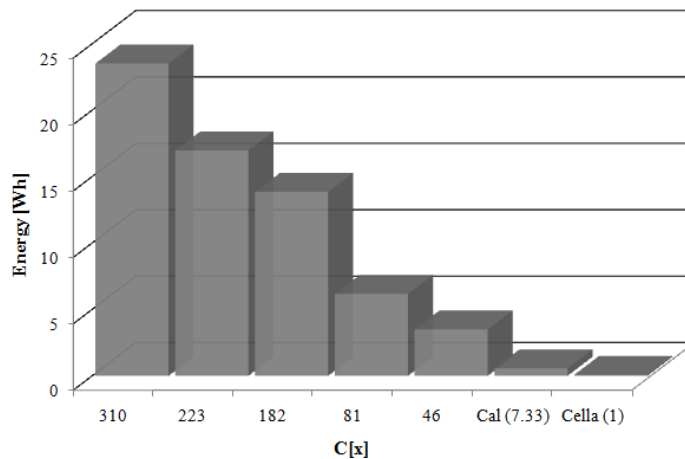


Figura VI.46 Energia elettrica in funzione di C

Le prestazioni del sistema sono state valutate anche dal punto di vista dell'energia elettrica, al variare della concentrazione. In Figura VI.46, considerando prove di otto ore con un simile livello di radiazione, è riportata l'energia elettrica prodotta dalla cella in funzione della concentrazione

Nella configurazione completa, il massimo valore di energia prodotta è di 23.5 Wh, a 310x, mentre, i valori più bassi, di circa 13.8, 6.1 e 3.5 Wh sono stati ottenuti, rispettivamente, a 182x, 81x e 46x. Sono, inoltre riportati i valori per le altre due configurazioni.

6.4.5.2. Monitoraggio delle temperature

Uno degli aspetti più importanti nel monitoraggio del sistema sperimentale è la misura della temperatura della cella durante il funzionamento. Tale parametro è infatti di difficile valutazione, soprattutto quando variano le condizioni. Le misure di temperatura sono state ripetute molte volte al fine di costruire i database per i modelli teorico – sperimentali. In questa sezione, riportiamo la temperatura misurata in diversi mesi, al variare chiaramente delle condizioni ambientali, come indicato in Figura VI.47 (Renno e Petito, 2016).

I valori di temperatura osservati, arrivano a superare i 65°C in alcuni casi. Pertanto, è fondamentale conoscere la temperatura della cella in ogni condizione, al fine poter valutare l'energia termica producibile attraverso il raffreddamento delle stesse.

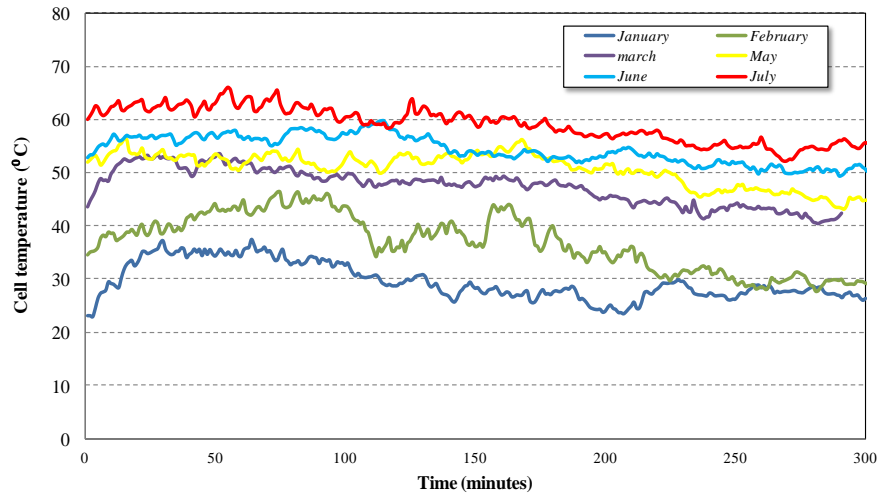


Figura VI.47 *Temperatura della cella in diversi mesi*

6.5. Risultati dei principali modelli teorico – sperimentali

La fase di modellazione teorico – sperimentale, descritta nei Capitolo 4 e 5, permette la definizione e la valutazione dei sistemi a concentrazione. Seppur, come ampiamente menzionato, i risultati delle campagne sperimentali siano stati impiegati nelle fasi di modellazione dell'input e caratterizzazione elettrica, nonché nella definizione del sistema e delle sue caratteristiche, i principali risultati, riportati in questa sezione si riferiscono a:

- Temperatura della cella
- Fluido termo – vettore.

Infatti, questi due aspetti, prevedono proprio l'elaborazione e la valutazione di modelli teorici a partire da dati sperimentali. In particolare, per la temperatura della cella analizzeremo i risultati del modello Random Forest, mentre per il fluido termo – vettore, i risultati dei modelli in Catia – SolidWorks – Ansys.

6.5.1. Risultati del modello Random Forest per la T cella

Il modello teorico – sperimentale della temperatura della cella è stato realizzato tramite l'algoritmo Random Forest che rappresenta una tecnica di tipo non lineare continua. In questo modo, è possibile sulla base dei dati raccolti, ottenere la temperatura per ogni condizione esterna (radiazione,

temperatura ambiente) ed interna (concentrazione, funzionamento). Come visto nel Capitolo 4, dopo aver scelto le quattro variabili di input, ed aver costruito i dataset, il modello è stato implementato tramite il software KNIME.

Il primo aspetto da esaminare è il numero di alberi (modelli) con cui si vuole comporre la foresta e la percentuale dei dati del dataset di partenza che si vuole impiegare per l'addestramento ed il test.

In fase di tuning, è stato fissato il numero di alberi in base all'MSE come mostrato in Tabella VI.8.

Tabella VI.8 Numero ottimale di alberi

Numero di modelli	Valore di MSE
50	3.935 °C ²
100	3.837 °C ²
200	3.828 °C ²
300	3.821 °C ²
400	3.819 °C ²

Si è scelto un numero di alberi pari a 100, infatti aumentando il numero, cresce la complessità computazionale ma l'errore si riduce di poco, quindi tale numero è sembrato un buon compromesso. In merito alla suddivisione del dataset, si è scelto, invece, di utilizzare l'80% dei dati per l'addestramento.

Il modello Random Forest può essere rappresentato graficamente tramite una serie di alberi di decisione che frammentano lo spazio degli input, grazie alla fase di training, per arrivare ad un unico valore di output per tutti i possibili valori di input, come indicato in Figura VI.48.

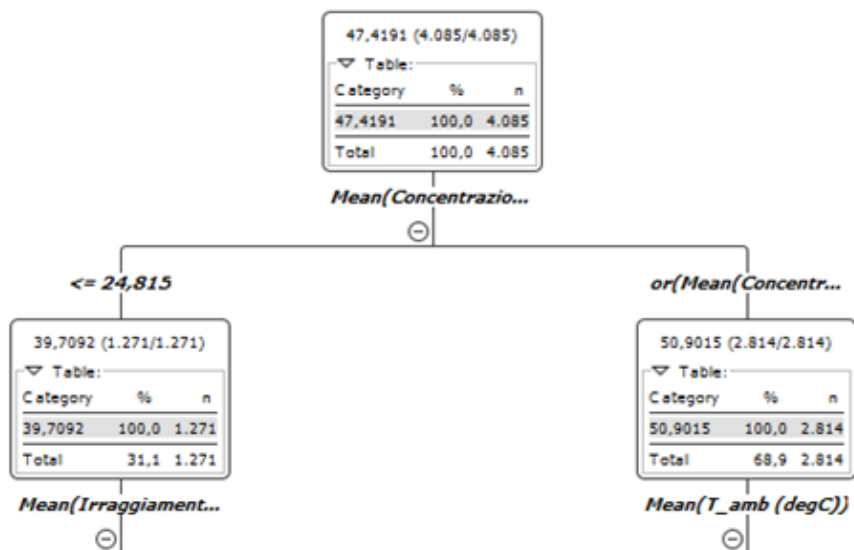


Figura VI.48 Parte di un albero del modello Random Forest

I livelli mostrati in cui si decompone l'albero sono solo 2, in realtà ogni albero ha tra i 27 e i 30 livelli diversi, in funzione del training. Lo spazio degli input si segmenta man mano che si scende di livello, ad esempio, al livello 0 di quest'albero si testa se la variabile concentrazione è minore o maggiore di un valore di soglia (es. 24.815). In questo modo si può segmentare lo spazio in due sottospazi, al primo split si ha un primo sottospazio ($C < \text{soglia}$) con 1271 valori ed un secondo ($C > \text{soglia}$) con 2814 valori. Per ciascun sottospazio si testa un'altra variabile di input, ad esempio la radiazione, imponendo una nuova soglia, in modo da ottenere una nuova segmentazione. Proseguendo di questo passo, si arriva all'ultimo livello del processo di addestramento. L'output finale sarà frutto della media degli output di ciascun albero. Questi output sono frutto del processo di discesa dei livelli dell'albero effettuato in funzione dei valori di input.

Il modello con 100 alberi ha permesso la valutazione della temperatura con buona accuratezza. Il primo risultato per comprendere la bontà del modello è la stima dell'Out of Bag Error (OOBE) sull'addestramento, tramite KNIME. In questo caso, si osserva l'errore sulle previsioni durante l'addestramento, impiegando, per ciascun albero, dati non utilizzati nel training (per quello specifico albero).

Quindi, nel training si usano tutti i dati del dataset, ma non tutti gli alberi usano gli stessi dati. In Figura VI.49, si può osservare lo scatterplot dei risultati di training, che permette di comprendere se il modello ha generalizzato e compreso il fenomeno. I dati impiegati in tale fase sono circa 5800, si nota una buona approssimazione tra valore reale e quello previsto, con le dovute eccezioni insite nella natura dei modelli previsionali.

Dopo aver validato la fase di training esaminando l'OOBE si può procedere con il test, nel quale si è impiegato il restante 20% del dataset, circa 1400 valori. La previsione in questa fase è ottenuta sfruttando tutti gli alberi della foresta, a differenza con quanto succede nel training.

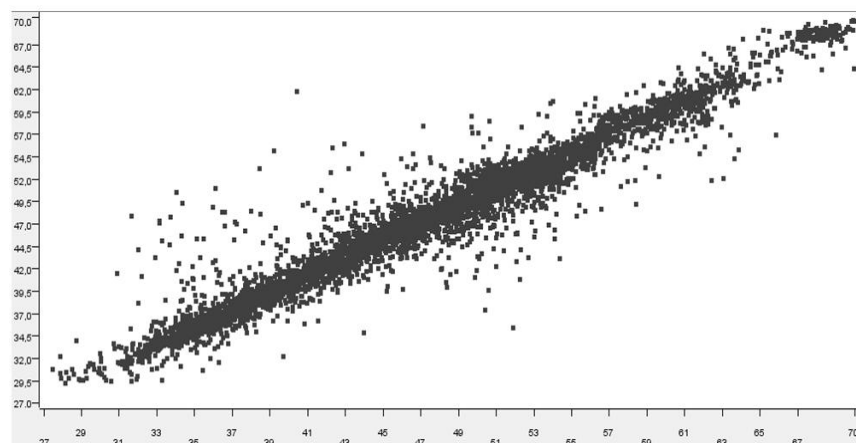


Figura VI.49 Scatterplot della fase di addestramento secondo logica OOBE

Capitolo 6

In Figura VI.50 sono riportati i risultati del test, che prevedono ottima corrispondenza tra i valori previsti e quelli di test.

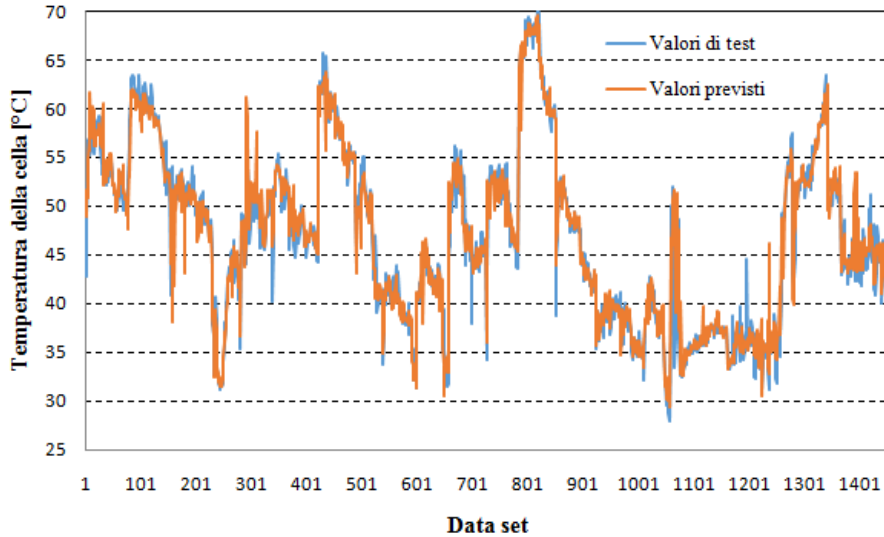
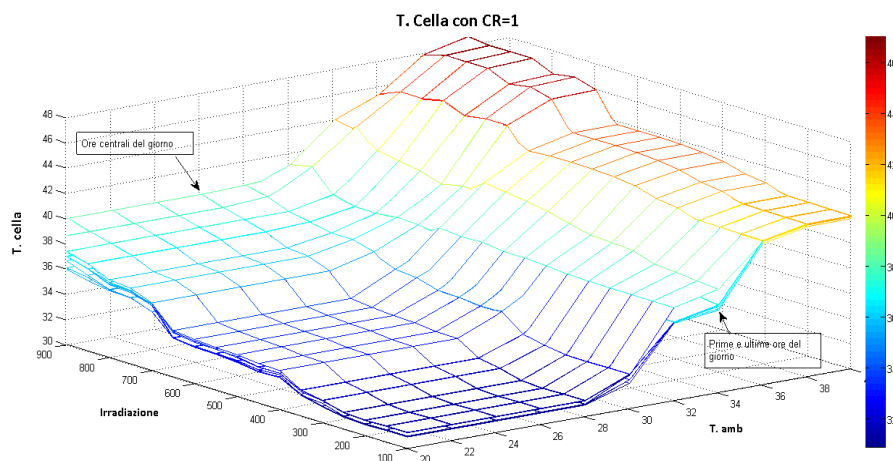


Figura VI.50 Risultati della fase di test

Avendo valutato la bontà del modello sui dati sperimentali raccolti ed impiegati per la sua costruzione, è possibile analizzare la risposta simulando il comportamento per nuove condizioni, sempre rilevate tramite il prototipo. È chiaro che il modello Random Forest ha costruito la propria conoscenza grazie a dei dati sperimentali raccolti, ma permette di generalizzare anche condizioni non rilevate con una buona approssimazione. A questo punto è interessante osservare la temperatura della cella al variare di tutti i parametri inizializzati.



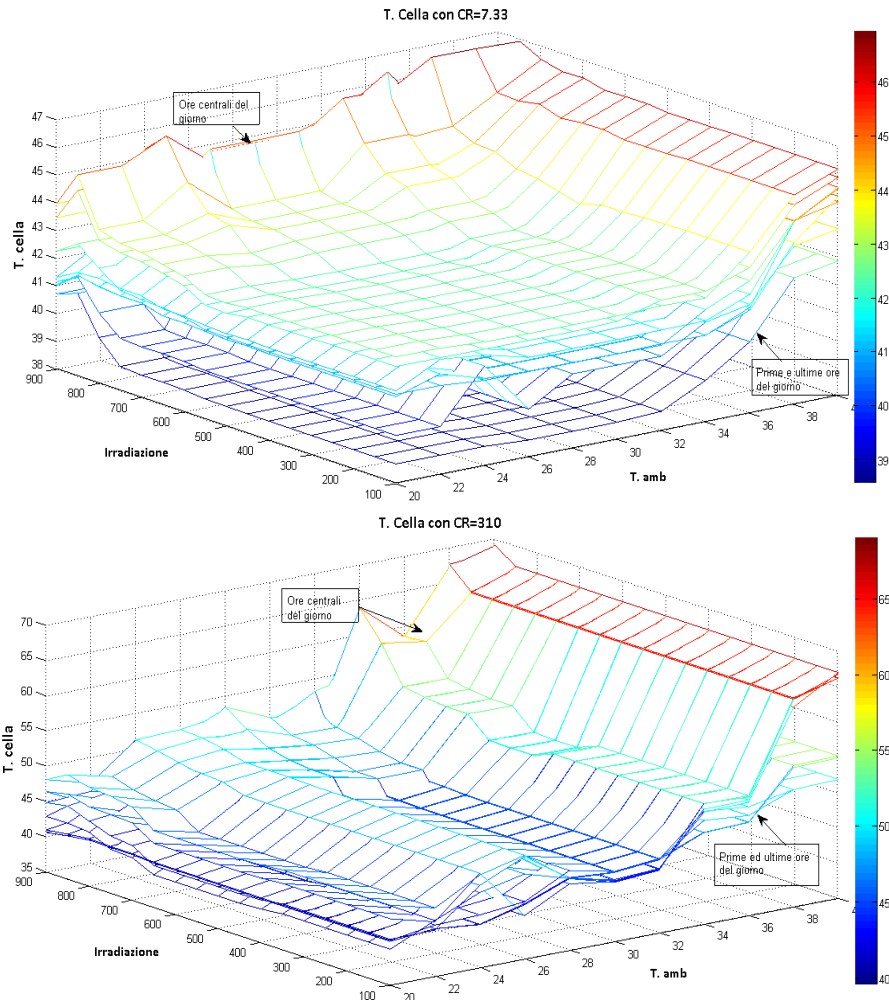


Figura VI.51 *T cella in funzione degli input per le 3 configurazioni*

Considerando le tre principali configurazioni: cella, caleidoscopio e sistema completo, rispettivamente con C pari a 1x, 7.33x e 310x, si può osservare la temperatura al variare dell'ora, della temperatura ambiente e della radiazione, per ciascuno schema, come riportato nei grafici di Figura VI.51.

Ogni grafico, a seconda della concentrazione (configurazione), riporta la T cella in funzione di radiazione e temperatura ambiente (sugli assi), mentre ciascuna superficie rappresenta l'ora del giorno (tra le 9:00 e le 18:00).

Nella prima configurazione ma massima T è stata 48°C, inoltre, il gradiente di temperatura è maggiore in funzione della T ambiente rispetto alla radiazione, questo risultato era attendibile in quanto siamo a

Capitolo 6

concentrazione 1. Un profilo di temperatura simile al precedente si può osservare anche nella configurazione col caleidoscopio, infatti, anche in questo caso C è bassa. Nella configurazione con il sistema completo, il trend è invertito, infatti è maggiore l'incidenza della radiazione in quanto siamo a $C=310$.

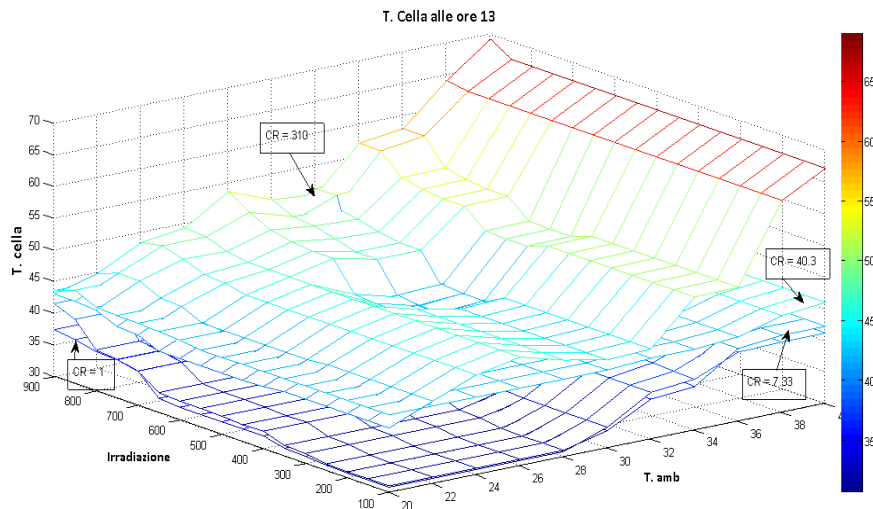


Figura VI.52 *T cella in funzione della concentrazione con Random Forest*

In questo caso si raggiungono picchi di 70°C, valutati anche sperimentalmente. Per osservare al meglio l'incidenza della concentrazione, è stata fissata un'ora del giorno (13:00) e sono state costruite 4 superfici, a diverse concentrazioni, che mostrano la T cella in funzione di T ambiente e radiazione, come riportato in Figura VI.52.

In questo caso, si osserva nettamente l'influenza che hanno C e radiazione nell'aumento della temperatura della cella.

6.5.1.1. Risultati statistici con Random Forest e confronto

Le previsioni della temperatura della cella, ottenute con il modello di Random Forest, sono state confrontate con i risultati di previsione ottenuti tramite un modello di regressione lineare ed una rete neurale, costruiti in KNIME, come descritto nel Capitolo 4.

Il confronto è stato effettuato tramite un'analisi statistica dell'errore nella previsione, compiuto da ciascun modello. I parametri usati come confronto sono: R^2 (goodness of fit), MSE (Mean Squared Error), RMSE (Root Mean Squared Error) e MAE (Mean Absolute Error). R^2 è quel valore compreso tra 0 e 1 che definisce la bontà di adattamento. Cioè, stabilisce se il modello spiega più o meno bene la varianza intrinseca del fenomeno modellato. La

sua rappresentazione grafica è rappresentata dallo scatterplot. Le altre grandezze sono misure di errore volte ad identificare una componente di deviazione dal valore vero rispetto ad uno previsto.

Per il calcolo dell'errore si è valutata la temperatura media predetta in un minuto, rispetto alla temperatura media osservata con il sistema sperimentale.

Le analisi statistiche sono state direttamente implementate tramite il software KNIME che prevede un blocco, chiamato "Scorer", per tali valutazioni. In Tabella VI.9 sono riportati i risultati di tale analisi.

Tabella VI.9 Risultati statistici e confronto con Random Forest

Modello	MSE [$^{\circ}\text{C}^2$]	RMSE [$^{\circ}\text{C}$]	MAE [$^{\circ}\text{C}$]	R^2
Regressione lineare	18.46	4.29	3.39	0.76
Rete neurale	12.05	3.47	2.88	0.79
Random Forest	3.81	1.95	1.17	0.95

Come si evince chiaramente dalla Tabella VI.9, il modello Random Forest è quello che permette una previsione della temperatura della cella più precisa e consente, pertanto, la valutazione del sistema a concentrazione soprattutto per quella che è la parte termica.

6.5.2. Risultati dei modelli termici in regime transitorio

In questa sezione riportiamo i risultati dei due modelli transitori descritti nel Capitolo 4 per la valutazione del fluido termo – vettore che raffredda le celle. Come detto in precedenza, il primo modello è più generale e considera solo uno schema point – focus, mentre il secondo modello, più specifico, permette di confrontare tipologie di circuito diverse, definendo gli scambi termici al variare della distanza tra le celle e considerando differenti volumi di controllo.

6.5.2.1. Risultati per il modello preliminare point – focus

Il modello in analisi considera un circuito point – focus dimensionato per l'installazione di 60 celle a tripla giunzione con un fattore di concentrazione, derivato dalla prima analisi sperimentale di circa 208x. In questo caso, considerando la cella a tripla giunzione da 5.5 mm^2 , il diametro interno del tubo in rame, è stato fissato a 3.0 cm, con uno spessore dell'isolante (Aerogel) di 1mm.

La velocità del fluido è stata imposta al valore di 0.38 m/s e le celle sono ad una distanza di circa 26 cm. Come si può osservare, questo primo

Capitolo 6

modello, sulla base della prima analisi sperimentale del prototipo, cerca di riprodurre la configurazione di sistema completo in serie, in modo da costituire un modulo point – focus. Pertanto tutte le principali dimensioni sono state fissate e si valuta la temperatura del fluido termo – vettore, solo all’uscita, in funzione della temperatura della cella.

In base alle temperature della cella misurate, nei grafici di Figura VI.53 si analizza la temperatura del fluido termo – vettore in una giornata estiva (a) ed una invernale (b).

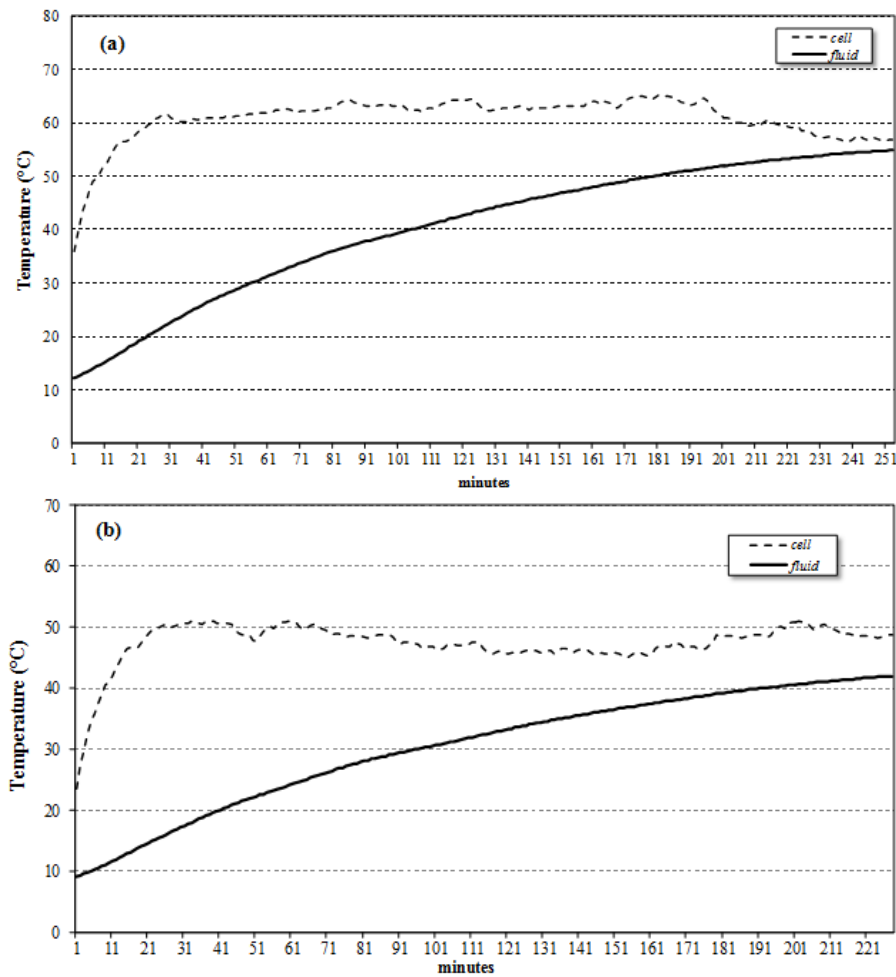


Figura VI.53 Temperatura del fluido con il primo modello in base a valori sperimentali (a) estate; (b) inverno

In una giornata estiva, il modello in Ansys mostra che, con una temperatura della cella media di circa 63°C, il fluido raggiunge la temperatura di 55°C in circa 4 ore. In una giornata invernale, caratterizzata

da una temperatura media della cella di circa 50 °C, il fluido arriva a 42°C in 220 minuti (Renno e Petito, 2016). Il modello in Ansys, in questo caso, modella la temperatura del fluido in base ai valori della T cella osservati.

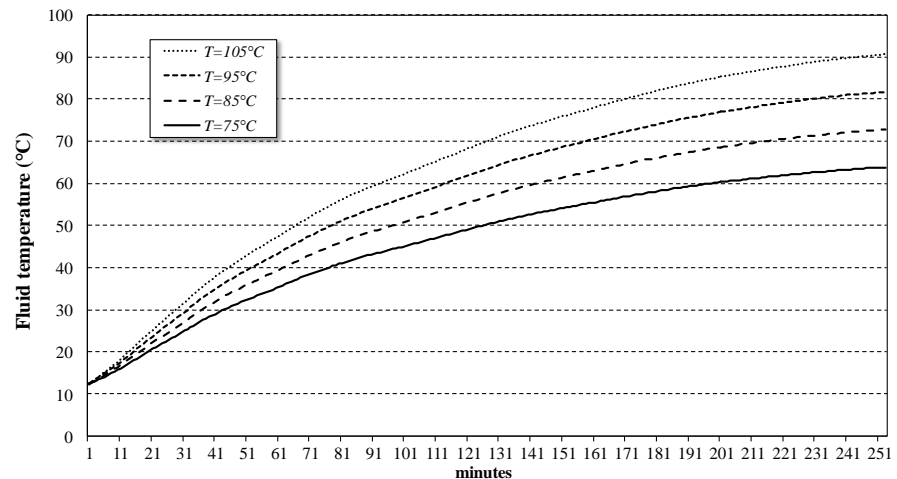


Figura VI.54 Temperatura del fluido in base a T celle teoriche

Tuttavia, visto il fattore di concentrazione piuttosto basso, si può generalizzare l'analisi, imponendo, allo schema presentato, temperature della cella maggiori per osservarne i risultati in termini di output. In Figura VI.54, variando la temperatura della cella tra 75 e 105°C si può osservare che il fluido raggiunge anche temperature di 90°C.

Tali risultati costituiscono un'interessante spunto per i possibili applicazioni del sistema CPV/T. Va comunque sottolineato che il primo modello transitorio risulta applicabile al solo schema presentato. In particolare non mostra cosa accade al variare delle condizioni iniziali, né analizza il comportamento del fluido lungo il circuito e lungo il diametro.

6.5.2.2. Risultati del modello termico generale e confronto tra configurazioni line e point – focus

I limiti del modello precedente vengono superati attraverso la riformulazione dello scambio termico ottenuta con il modello termico transitorio generale, presentato nel Capitolo 4. In questo caso, lo studio ha previsto la valutazione dello scambio termico in ogni condizione di funzionamento. Nello specifico, si è modellato il caso in cui le celle fossero a distanza variabile, predisponendo un insieme di volumi di controllo ed equazioni diverse che permettessero di valutare lo scambio per zone sottoposte, e non, a concentrazione. Inoltre, si è valutato uno spessore dell'isolante variabile tra 0.5 e 1.5 cm con una velocità del fluido compresa

Capitolo 6

tra 0.2 e 0.9 m/s. Partendo da tali ipotesi, come visto, sono stati presentati due schemi alternativi realizzati in SolidWorks, uno line ed uno point – focus. In questo caso, le celle a tripla giunzione presentano un'area di 1 cm^2 , quindi il diametro interno del tubo è stato fissato a 4.2 cm, con uno spessore di 3 mm, arrivando ad un diametro esterno è di 4.8 cm. In entrambi i casi sono state considerate 60 celle, pertanto, il circuito line – focus presenta una lunghezza totale di 3.56 m , mentre quello point di 21.77 m.

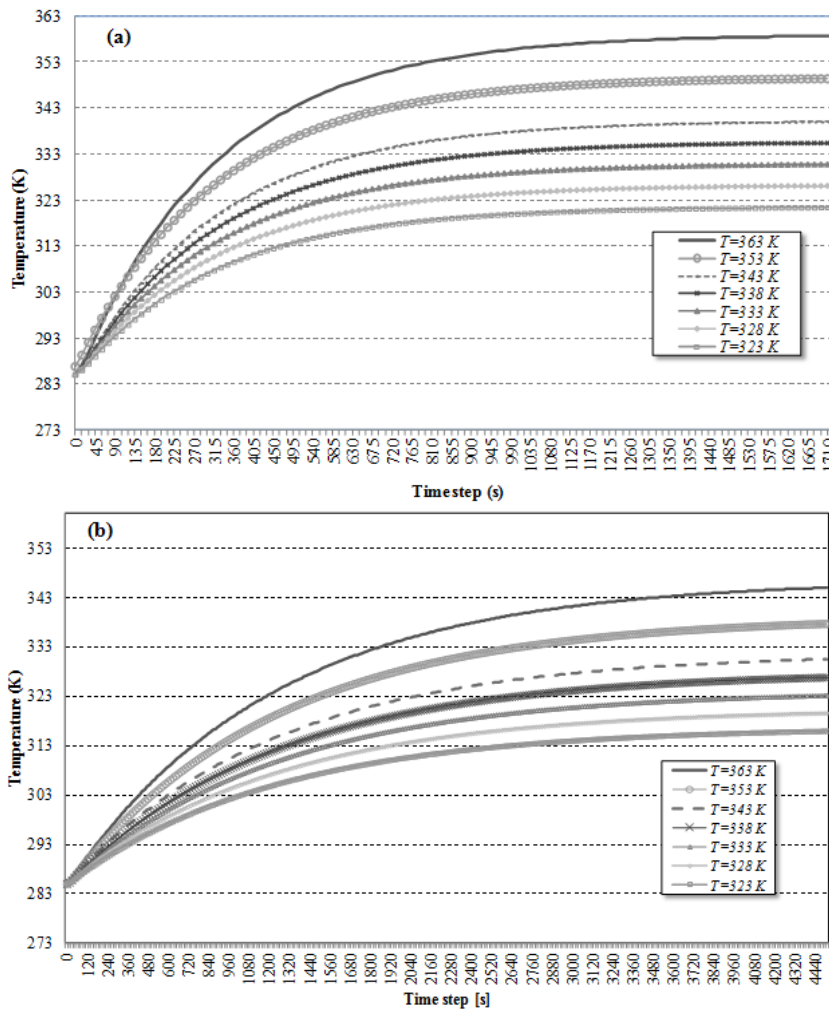


Figura VI.55 T uscita del fluido (a) line – focus (b) point – focus

Con tali ipotesi, i modelli sono stati simulati in Ansys al fine di valutare le prestazioni in termini di temperatura del fluido termo – vettore. Nei grafici in Figura VI.55 si può osservare la temperatura di uscita del fluido con il sistema line (a) e point (b) al variare della temperatura della cella tra 50 e

90°C (323K – 363K). Si può notare che le temperature raggiunte nella configurazione line – focus sono sempre maggiori. In Figura VI.56 sono confrontati i tempi in cui i due sistemi raggiungono una condizione di stazionarietà.

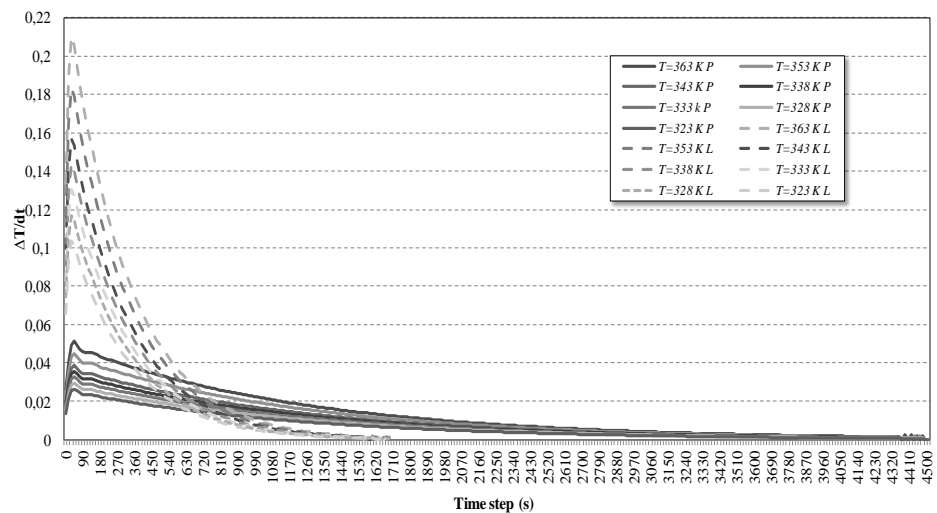


Figura VI.56 Condizioni di stazionarietà

In particolare, si riporta la derivata della temperatura del fluido rispetto al tempo per tutte le temperature della cella. Le linee del line – focus sono tutte tratteggiate. Pertanto, quando la derivata è vicino a zero, viene raggiunta la condizione di regime. Nel caso line tale condizione è raggiunta in circa 1700 secondi, mentre per il point occorrono 4500 secondi. Pertanto, le configurazioni line – focus, nelle stesse condizioni, permette un riscaldamento più rapido. In Tabella VI.10, si riportano, per ciascuna temperatura iniziale della cella, la temperatura massima raggiunta dal fluido nella condizione di stato stazionario.

Tabella VI.10 Temperature massime a regime per le due configurazioni

		T cella [K]						
		363	353	343	338	333	328	323
PF	T uscita del fluido [K]	344.8	337.5	330.3	326.7	323.1	319.4	315.8
	Differenza di T a regime	18.2	15.5	12.7	11.3	9.90	8.60	7.20
LF	T di uscita del fluido [K]	358.5	349.2	339.9	335.2	330.5	325.9	321.2
	Differenza di T a regime	4.50	3.80	3.10	2.80	2.50	2.10	1.80

Capitolo 6

Alla luce dei risultati riportati si può evincere che con la configurazione line – focus, per qualsiasi temperatura della cella, si raggiungono temperature più alte del fluido termo – vettore in un tempo più breve. Dopo aver esaminato cosa accade al fluido in uscita, possiamo osservare cosa avviene lungo il circuito. Nei grafici in Figura VI.57 viene riportato l'andamento qualitativo del fluido lungo i due circuiti considerando una temperatura della cella di 90°C (363K), nella condizione di regime.

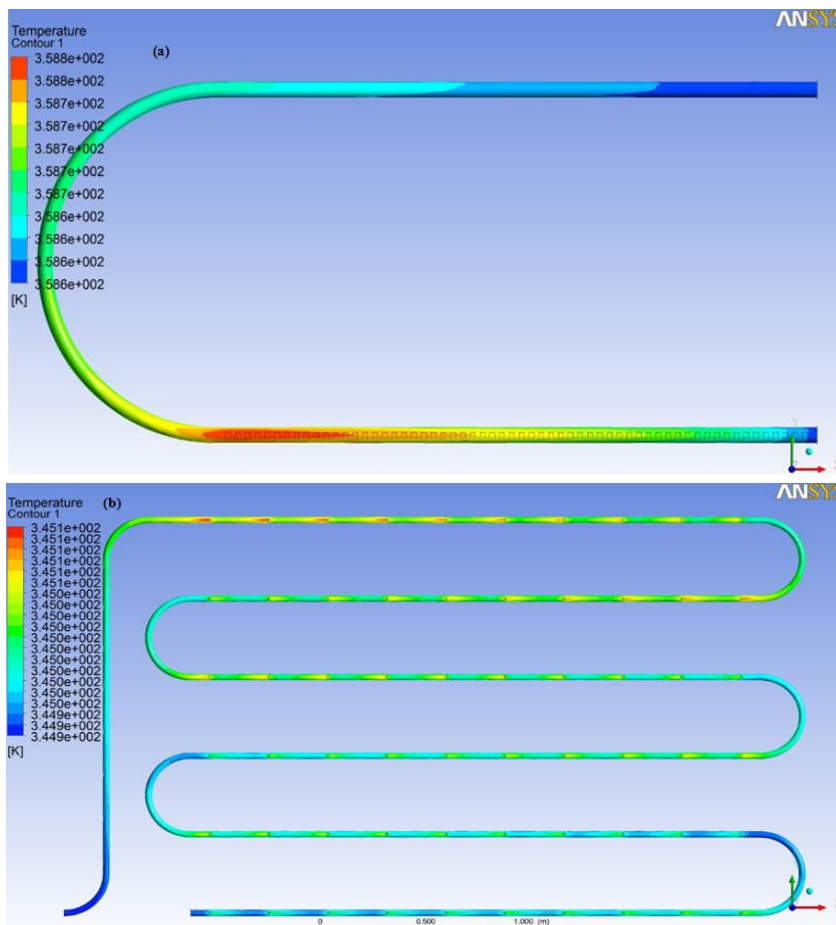


Figura VI.57 Andamento qualitativo lungo il circuito (a) line; (b) point

Nei grafici in Figura VI.58, invece, l'analisi mostrata è più quantitativa e si osserva la temperatura del fluido lungo il circuito in tre punti specifici: sotto cella, al centro del tubo e nella parte inferiore dello stesso, sia per lo schema line (VI.58a) che per quello point (VI.58b).

L'analisi è stata condotta considerando due valori iniziali della temperatura della cella: 363K e 323K. In particolare, per la configurazione line – focus si può notare una differenza iniziale in termini di temperatura tra

questi tre punti, soprattutto nella fase transitoria. Comunque, una volta raggiunta la condizione di regime, le temperature sono molto vicine. Nella configurazione point - focus, la differenza di temperatura tra i punti è meno accentuata. Il modello in Ansys permette di valutare, in questo caso, anche come varia la temperatura della cella lungo il diametro del tubo.

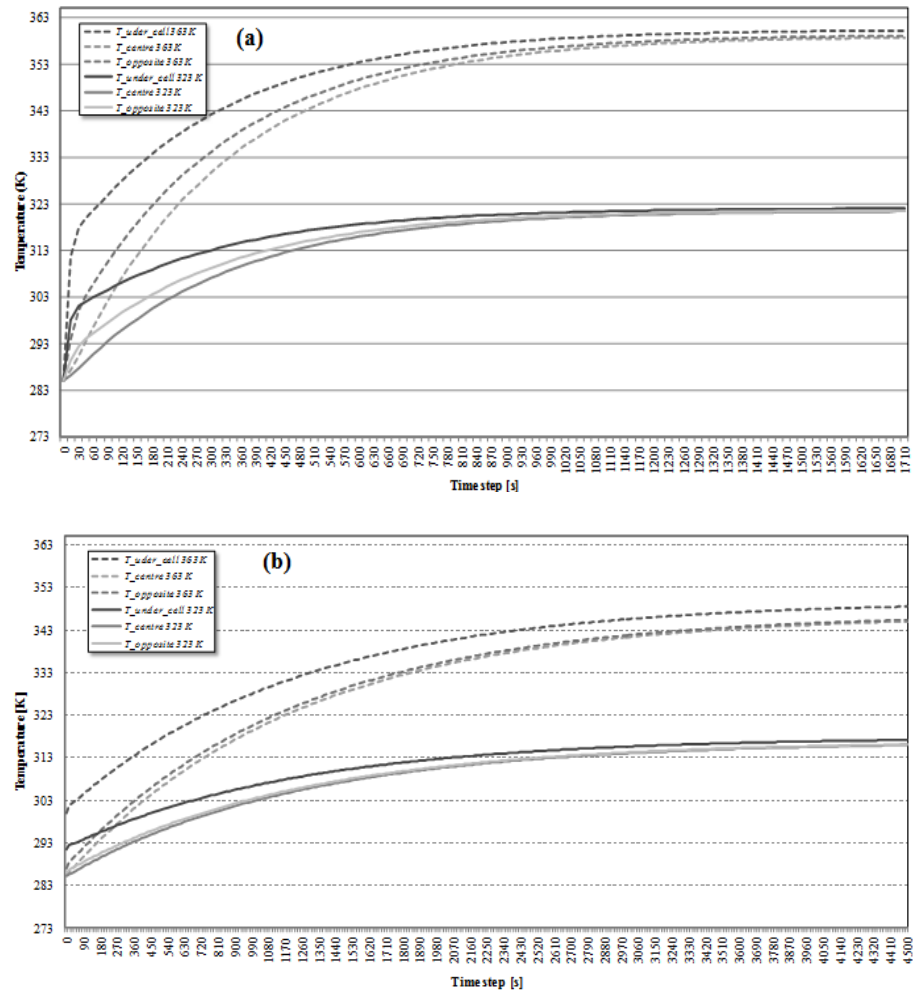


Figura VI.58 T fluido in tre differenti punti del circuito (a) line; (b) point

In particolare, in Figura VI.59 si riporta l'andamento per la configurazione line – focus. Come si può osservare, l'asse x è stato impostato nel centro del tubo, quindi varia tra -2.4 cm e 2.4 cm considerando il diametro interno e lo spessore del tubo. La cella è stata posta nella parte destra del diagramma (a 2.4 cm). La Figura mostra la temperatura del fluido in tre istanti diversi e considerando due temperature iniziali per la cella. I time step riportati sono: (1) dopo 15 secondi, (2) una volta raggiunta la

Capitolo 6

condizione stazionaria e (3) una fase temporale intermedia. Le temperature iniziali della celle sono 363 K e 323 K.

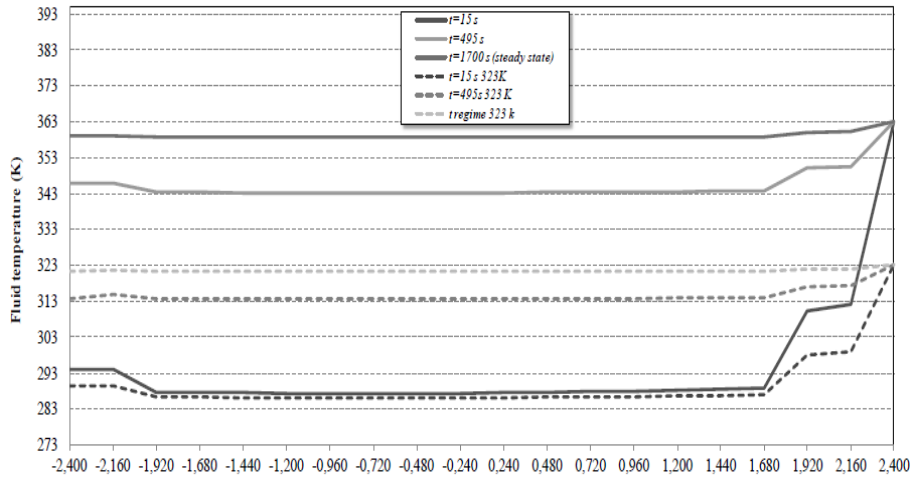


Figura VI.59 T del fluido lungo il diametro per lo schema line – focus

Per ciascun time step, si nota una differenza di temperatura sensibile nella parte del tubo in cui è stata posizionata la cella, mentre più ci si avvicina allo stato stazionario, più la temperatura nella parte di tubo più distante dalla cella tende a divenire uniforme. La valutazione della temperatura lungo il diametro del tubo è stata evidenziata anche tramite un'analisi qualitativa in Ansys, mostrata, sempre per lo schema line, in Figura VI.60.

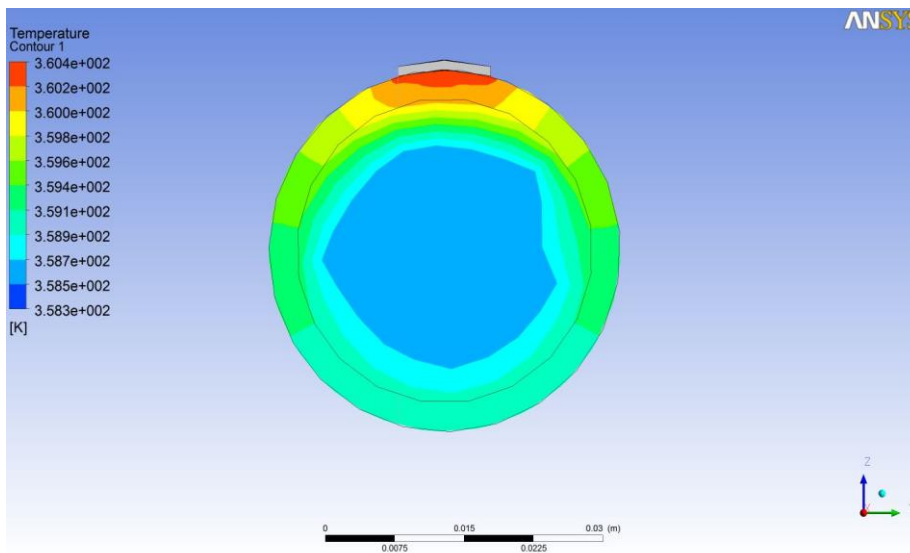


Figura VI.60 T del fluido (Ansys) lungo il diametro (line – focus)

Le stesse analisi sono state ripetute per la configurazione point, ottenendo risultati analoghi (Renno et al., 2017b). L'analisi finora riportata ha considerato una velocità di 0.4 m/s ed uno spessore dell'isolante di 1.0 cm. Come detto il modello permette di variare sia la velocità del fluido che lo spessore. Nei grafici in Figura VI.61 è analizzata l'incidenza della variazione di tali parametri per una configurazione line – focus.

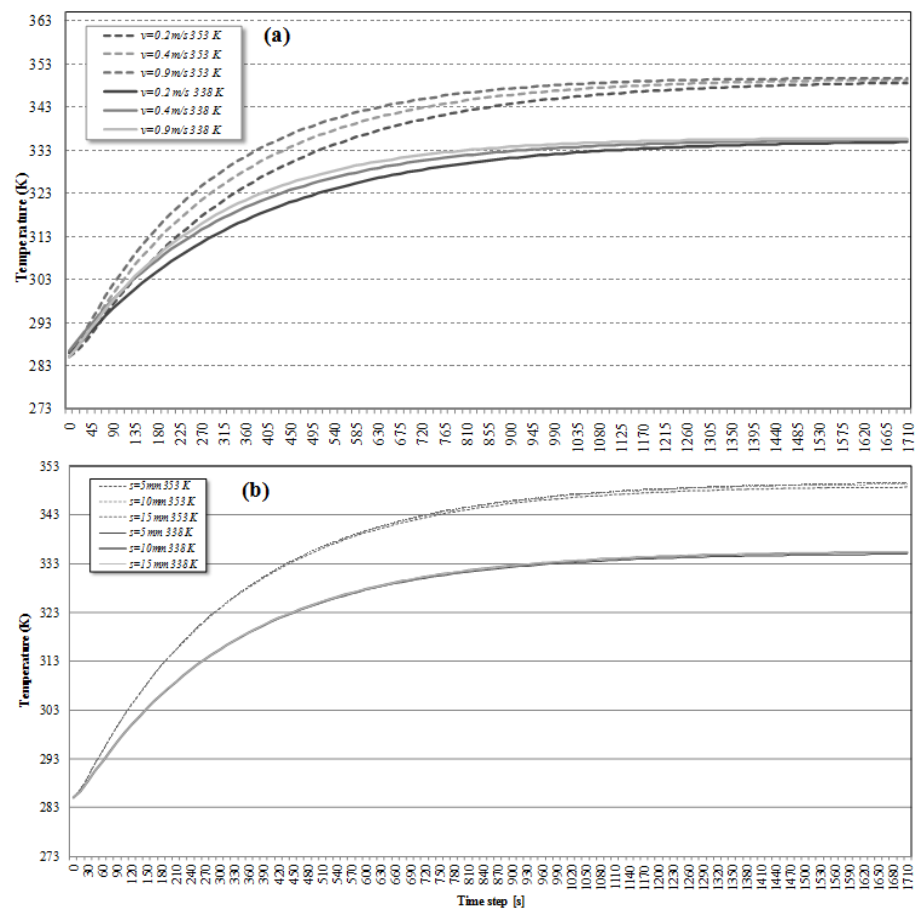


Figura VI.61 Analisi parametrica per lo schema line (a)isolante; (b)velocità

L'analisi, soprattutto quando si è vicini alla condizione di stazionarietà, mostra temperature molto vicine in ogni caso. Come in precedenza, gli stessi risultati sono stati ottenuti per la configurazione point (Renno et al., 2017).

Tramite il modello realizzato è possibile osservare anche il funzionamento del sistema di raffreddamento, in base a determinati set point di uscita per la temperatura del fluido termo – vettore.

In particolare, considerando la configurazione line – focus e quindi la lunghezza effettiva del circuito, in Figura VI.62, in base al set point viene

mostrato il numero di giri necessari per raggiungere tale valore di temperatura. I tre set point sono stati fissati in corrispondenza di tre diverse temperature iniziali delle celle. Il primo a 323K con T cella di 338 K, il secondo a 333 K con T cella di 353K, il terzo a 343K con T cella di 363K.

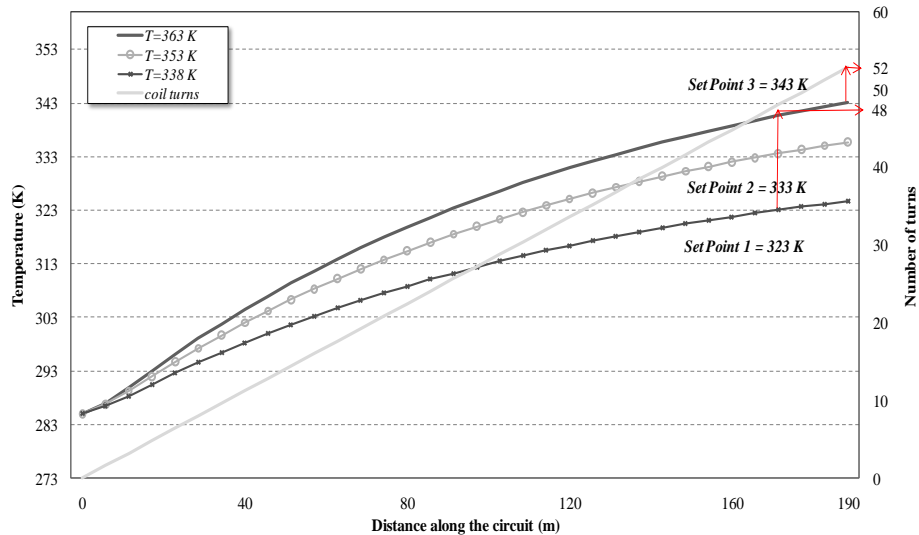


Figura VI.62 Funzionamento del circuito line con diversi set point

Si può notare che sono necessari 48 cicli per raggiungere il primo set point, coprendo una distanza di circa 170 m, mentre il terzo set point viene raggiunto per mezzo di 52 giri. L'analisi è stata ripetuta per il sistema point – focus, considerando la sua lunghezza ed imponendo gli stessi set point. In particolare, sono necessari circa 47 cicli per il primo set point, coprendo una distanza di circa 1000 m, mentre 62 giri sono necessari per la terza temperatura.

Dalle analisi presentate, la configurazione line – focus garantisce migliori prestazioni in ogni condizione, pertanto, come visto nella fase sperimentale, si è progettato un nuovo prototipo sulla base di tale schema.

Al fine di avere un primo risultato del possibile comportamento di tale impianto durante il funzionamento, si è impiegato il modello Ansys considerando temperature sperimentali, misurate nel periodo estivo della seconda campagna di prove. In particolare, in Figura VI.63 è riportato l'andamento della temperatura del fluido per uno schema line – focus, con temperature sperimentali della cella misurate a Luglio 2016. I test, condotti tra le 10:30 e le 16:30 con una T cella media di 338K, mostrano una temperatura del fluido media di 328 K. I risultati dei modelli termici non solo permettono di scegliere tra le varie configurazioni di sistema a concentrazione, ma consentono anche di validare, ancora una volta, la bontà del CPV/T dal punto di vista termico.

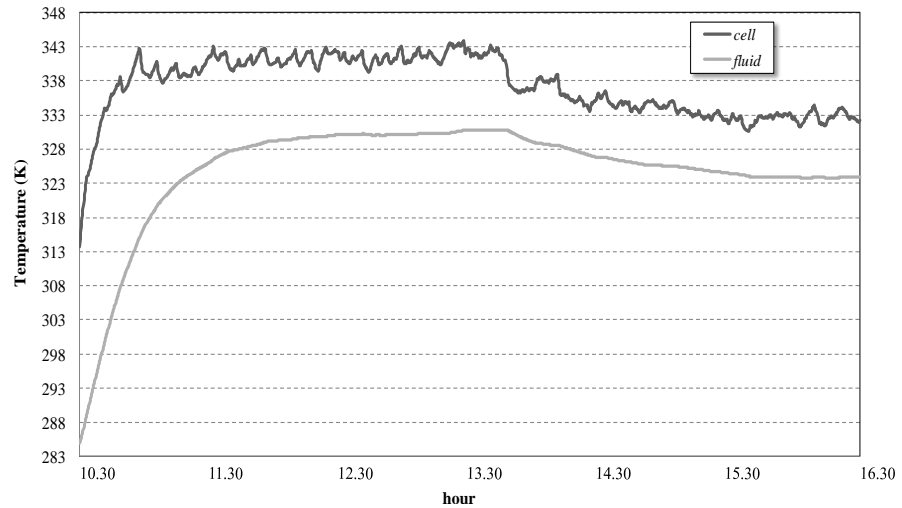


Figura VI.63 *T fluido con temperature della cella sperimentali (estate)*

6.6. Applicazioni e modello integrato per la valutazione

energetico – economica dei sistemi a concentrazione

I risultati mostrati finora hanno permesso di valutare la producibilità di un sistema a concentrazione sia dal punto di vista elettrico che termico. In particolare, il principale obiettivo dell'elaborato è quello di valutare teoricamente e sperimentalmente un sistema a concentrazione a prescindere dalle specifiche di impianto.

In fase modellistica, tuttavia, abbiamo discusso di un modello integrato che permette la valutazione delle prestazioni energetico – economiche di un sistema CPV/T una volta considerata un'applicazione specifica. In questo senso, i sistemi a concentrazione possono essere impiegati per il soddisfacimento delle richieste di un'utenza domestica. Inoltre, vista la loro natura modulare e la possibilità di configurare l'impianto a seconda delle richieste, non è da escludere anche qualche applicazione industriale.

In generale, come analizzato nel Capitolo 4, una volta predisposti gli strumenti teorico – sperimentali per la valutazione degli input e del funzionamento del sistema a seconda delle variabili in gioco, a partire dalle richieste dell'applicazione specifica, il sistema a concentrazione può essere dimensionato al fine di analizzare la sua risposta energetico – economica.

Pertanto, in questa sezione, si analizzeranno i risultati di alcuni casi specifici. In particolare osserveremo:

- I possibili fabbisogni energetici dell'utenza;

Capitolo 6

- La connessione dell'impianto all'utenza finale;
- Risultati del modello di scelta con esempi di soddisfacimento delle richieste energetiche;
- Analisi dei costi;
- Analisi di manutenzione ed impatto ambientale.

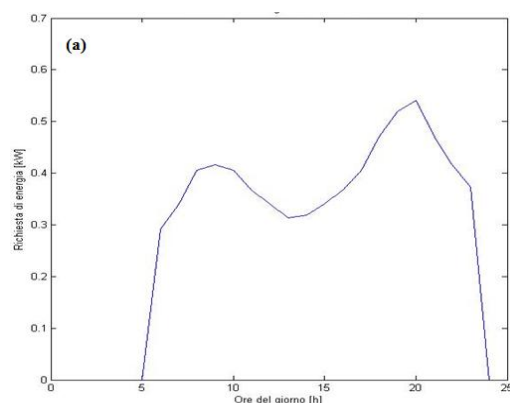
In questa fase, quindi, si osserva di volta in volta come il possibile sistema a concentrazione, dimensionato nello specifico in termini di concentrazione, numero di celle, numero di moduli e configurazione, risponda all'applicazione definita.

6.6.1. Le richieste energetiche dell'utenza

La prima fase, per definire il sistema a concentrazione per una specifica applicazione, è la valutazione dei carichi energetici che l'utenza presenta. In questa sezione, a titolo di esempio, si riportano i risultati per un caso studio riferito ad un'utenza domestica. La possibilità di modulare l'impianto, permette di poter estendere il discorso a differenti tipologie di utenza.

Le principali richieste energetiche di un'utenza domestica, come detto, sono elettrica, termica per usi – igienico sanitari e riscaldamento, frigorifera. Le richieste specifiche dipendono dalla zona considerata, dalla metratura dell'utenza, dal numero di occupanti e dai loro trend di consumo. Inoltre, a seconda del modo in cui le richieste frigorifere sono soddisfatte, tale carico può configurarsi come una nuova richiesta elettrica, se si impiegano tradizionali macchine frigorifere elettriche (EHP), oppure una nuova richiesta termica, qualora si pensi ad uno schema più innovativo con pompe di calore ad assorbimento (AHP) (Renno e Petito, 2013).

Le richieste, presentano una variabilità sia giornaliera che stagionale, pertanto, possiamo presentare alcuni esempi nei grafici di Figura VI.64. In particolare, si può osservare il trend giornaliero dei carichi elettrici, termici e frigoriferi, per un'utenza al Sud Italia che non supera i 200m² con 4 persone.



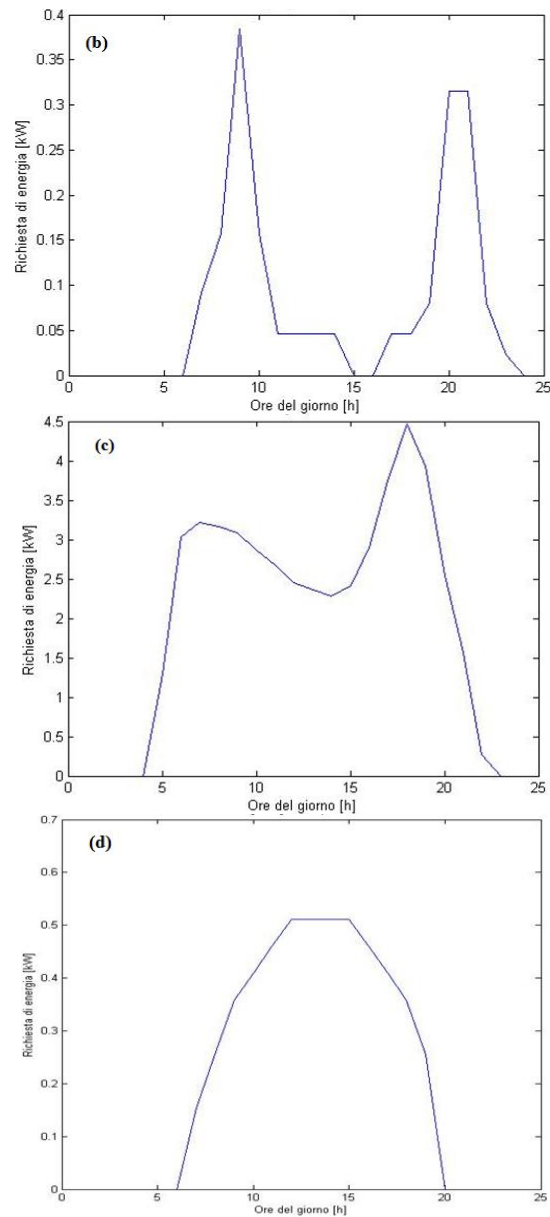


Figura VI.64 Esempio di carichi giornalieri (a) elettrici; (b) termici per acqua calda sanitaria; (c) termici per riscaldamento; (d) frigoriferi

Chiaramente, tali carichi giornalieri sono un esempio e dipendono dalla stagione che si considera. In generale, non dettagliando giorno per giorno il carico specifico, in Figura VI.65, sono riportati i carichi medi mensili per ciascuna richiesta (Renno e Petito, 2015).

Capitolo 6

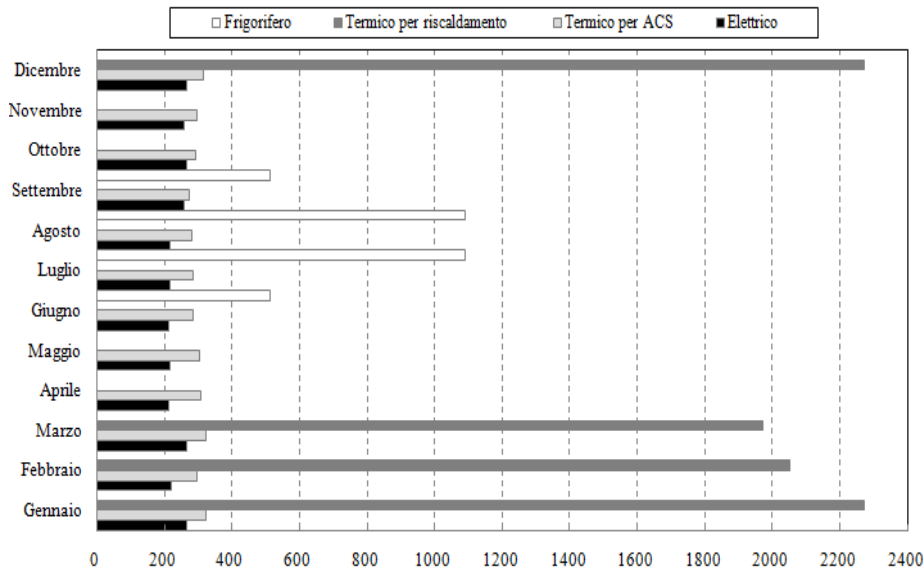


Figura VI.65 Carichi medi mensili per un'utenza al Sud Italia

I carichi medi sono stati valutati secondo quanto riportato al Capitolo 4. In generale, il carico elettrico medio è di circa 3000kWh/anno, quello termico sia per ACS che per riscaldamento, è compreso tra i 13000 ed i 16000 kWh/anno, considerando una caldaia tradizionale da circa 10 kW. Infine il carico frigorifero, nei mesi estivi varia, in funzione dei trend di consumo, tra i 2500 e i 3500 kWh/anno. Tali carichi medi, possono essere impiegati per la scelta ed il dimensionamento di un sistema CPV/T.

6.6.2. Possibile schema di connessione all'utenza

L'impianto a concentrazione per un'utenza domestica deve prevedere la presenza di un serbatoio per l'accumulo di energia termica e considerare la connessione alla rete elettrica. In Figura VI.66 si può osservare un esempio di connessione dell'impianto, prevedendo diversi moduli point – focus il cui numero varia in funzione delle richieste.

Nei grafici di Figura VI.67, invece, si può particolareggiare la connessione inerente alla parte termica, considerando (Figura VI.67a) che il carico frigorifero sia soddisfatto elettricamente, quindi il sistema rappresenta un cogeneratore, oppure valutando l'ipotesi trigenerativa (Figura VI.67b), in cui tramite una pompa ad assorbimento si soddisfino i bisogni di refrigerazione.

Come si può osservare, è sempre presente una caldaia di integrazione al fine di garantire la continuità del servizio termico, mentre la rete garantisce la continuità del servizio elettrico. Si può ancora notare che nei grafici di

Figura VI.67, l'impianto previsto è di tipo line – focus, proprio per mantenere entrambe le possibilità.

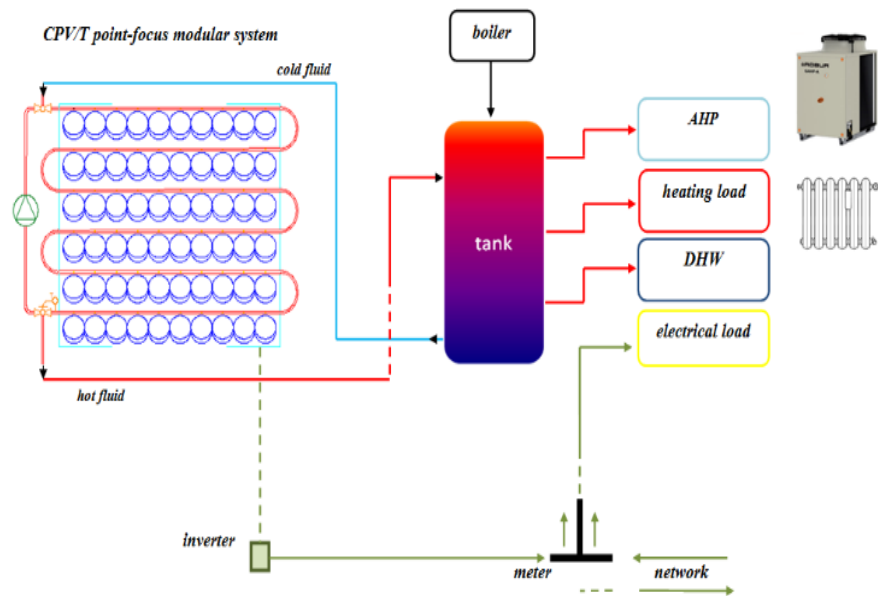
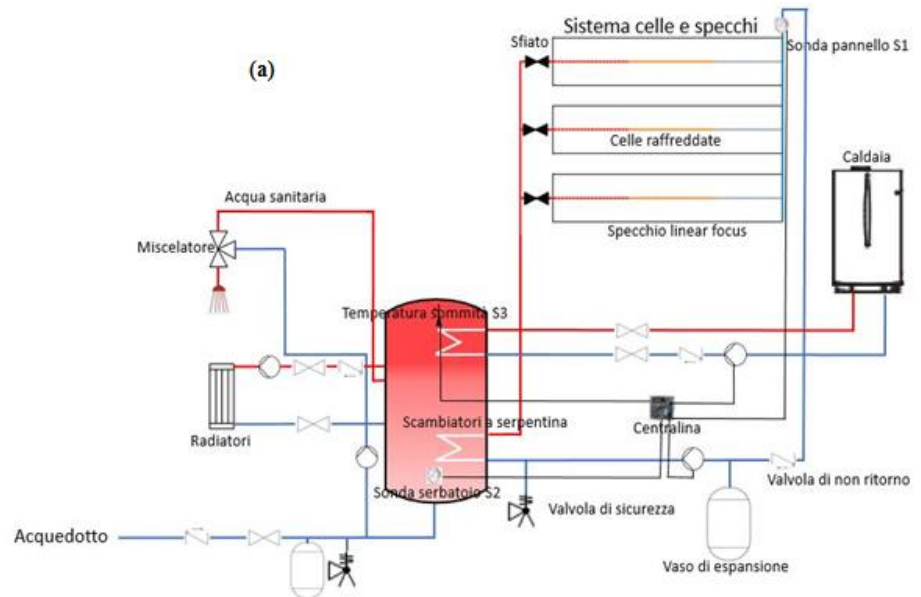


Figura VI.66 Connessione generale dell'impianto all'utenza



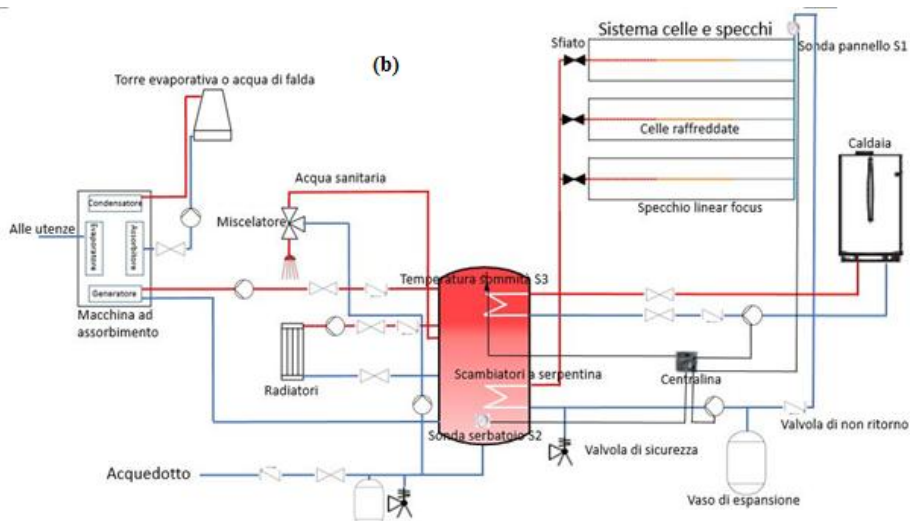


Figura VI.67 Schema di connessione della parte termica (a) caso cogenerazione; (b) caso trigenerazione

Nello specifico, tale tipo di impianto considera:

- Fluido termo – vettore: acqua e glicole per evitare congelamenti;
- Tubature in rame o acciaio inossidabile;
- Pompe di mandate e ritorno del fluido di potenza variabile;
- Vaso di espansione, valvola di sicurezza e sfiato;
- Serbatoio stratificato con centralina per il controllo delle temperature;
- Circuito primario tra il sistema CPV/T ed il serbatoio;
- Circuito secondario che collega il serbatoio alle utenze.

La regolazione della parte elettrica avviene tramite il contatore fotovoltaico che a seconda della situazione richiede o immette energia scambiando con la rete.

6.6.3. Esempi applicativi: modello di scelta e costi

Il sistema CPV/T, connesso all'utenza, può essere dimensionato a seconda dei carichi. In particolare, conoscendo le richieste energetiche, si possono sfruttare i modelli alle reti neurali per il calcolo dell'input ed i modelli teorico – sperimentali per il calcolo dell'energia producibile con l'impianto, al fine di definirne fattore di concentrazione, numero di celle e disposizione in moduli. Nei grafici di Figura VI.68, si può osservare il modello di scelta descritto nel Capitolo 4. In questo caso, partendo da una configurazione point – focus, si definisce il numero di celle in base alle richieste elettriche e termiche annuali, si valuta il numero di moduli in

funzione dello spazio occupato e si dà una prima stima dei costi (Renno e Petito, 2015).

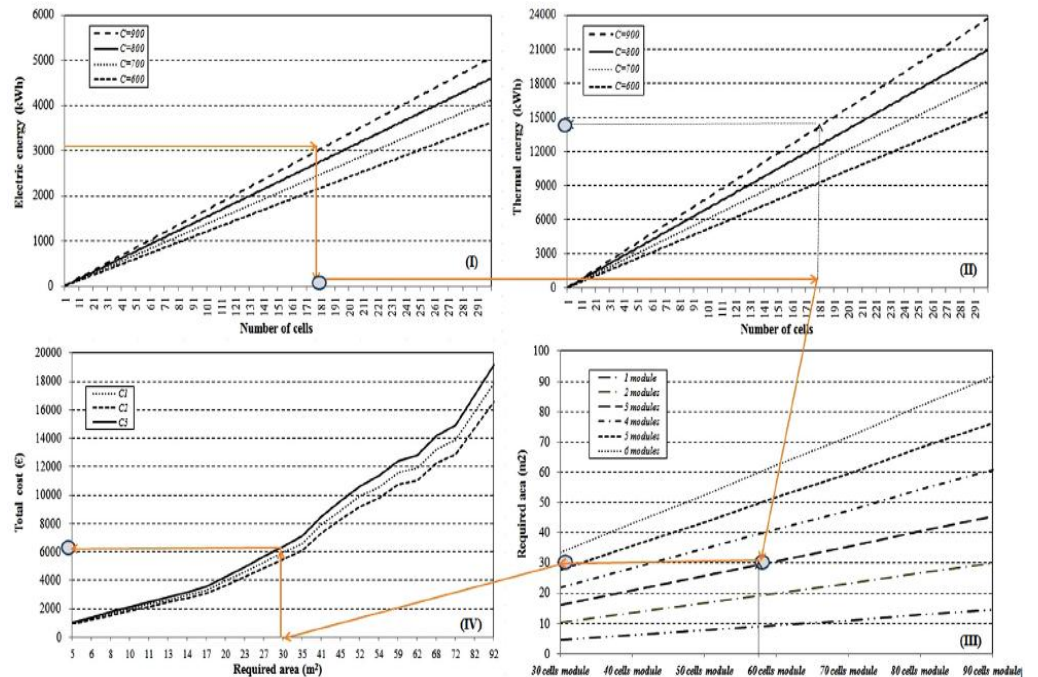


Figura VI.68 Risultati del modello di scelta per un esempio applicativo

Nel caso mostrato in Figura, considerando un'utenza al Sud Italia, si sceglie un sistema point – focus con un fattore C di 900 che presenta 180 celle disposte in tre moduli da 60.

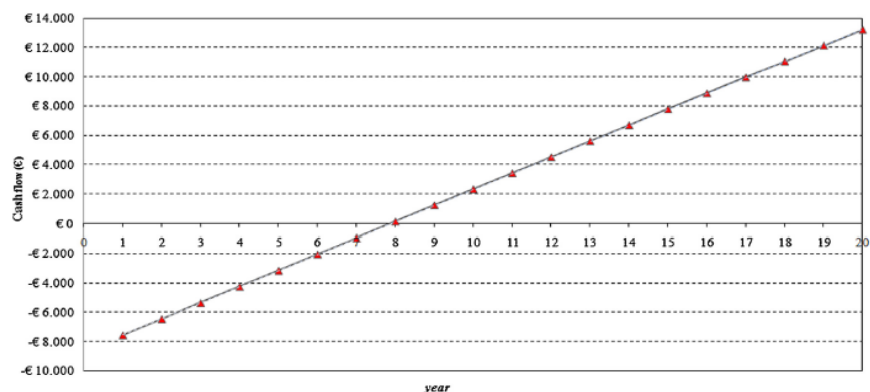


Figura VI.69 SPB dell'impianto con il modello di scelta

Il sistema permette complessivamente un'energia elettrica e termica annua, rispettivamente circa di 3100 kWh e 14800 kWh. Il costo

complessivo dell'impianto, per i soli moduli è circa di 8k€. A partire da tale valore e considerando il modello dei flussi di cassa, mostrato nel Capitolo 4, il SPB dell'impianto è intorno agli 8 anni, come riportato in Figura VI.69.

Possiamo osservare, in Figura VI.70, come la presenza della caldaia di integrazione sia necessaria in quanto, a partire dalle stime di energia termica prodotta, non sempre i carichi possono essere soddisfatti, soprattutto nel periodo invernale (Renno e Petito, 2013).

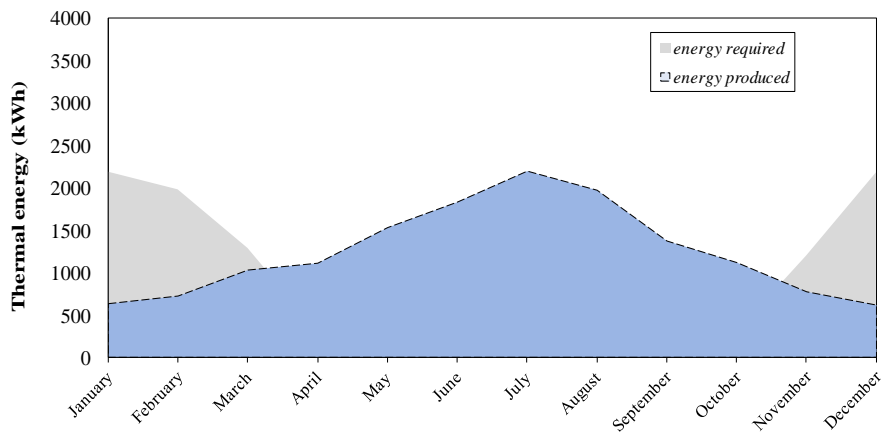


Figura VI.70 Esempio di energia termica prodotta e richiesta

I risultati presentati, rappresentano una prima applicazione delle valutazioni generali possibili, una volta resi disponibili tutti gli strumenti di calcolo e valutate le esigenze energetiche.

Va sottolineato che i costi dell'impianto dipendono dal tipo di celle scelte e dai concentratori, nonché dalla possibilità di avvalersi di una AHP per le richieste frigorifere. In generale, il costo oscilla tra gli 8000 ed i 12000 €, dove la componente più importante è rappresentata dall'insieme ottica – cella.

6.6.4. Esempi applicativi: nuove stime di producibilità e confronti

Un ulteriore esempio della valutazione energetica di un sistema a concentrazione, considera un impianto pint – focus con circa 200 celle a tripla giunzione ed un fattore C pari a 800. In questo caso, l'analisi prevede, per un'utenza sita a Salerno, la valutazione della radiazione diretta e globale attraverso le reti neurali. In questo caso, le prestazioni energetiche dell'impianto, sono confrontate con quelle di un impianto fotovoltaico, che sfrutta la radiazione globale, della potenza di picco di 3 kW con 12 moduli da 250 Wp.

In Tabella VI.11, sono riportati i risultati dell'analisi energetica mensile. Come si può osservare, l'impianto a concentrazione, oltre a riportare una

producibilità elettrica confrontabile con quella dell'impianto fotovoltaico tradizionale, permette anche di soddisfare parte della richiesta termica.

Pertanto, esso rappresenta una soluzione per l'ottenimento combinato di energia, in considerazione delle possibili richieste di un'utenza domestica (Renno et al., 2016b).

Tabella VI.11 *Confronto tra CPV/T e PV*

Mesi	Energia PV		Energia CPV/T	
	Elettrica [kWh _{el}]	Elettrica [kWh _{el}]	Elettrica [kWh _{el}]	Termica [kWh _t]
<i>Gennaio</i>	103.0	97.71	331.1	
<i>Febbraio</i>	123.8	119.1	406.2	
<i>Marzo</i>	238.6	235.2	814.7	
<i>Aprile</i>	295.8	295.5	1028	
<i>Maggio</i>	351.7	351.6	1247	
<i>Giugno</i>	406.9	414.6	1499	
<i>Luglio</i>	428.7	433.7	1576	
<i>Agosto</i>	404.2	402.5	1462	
<i>Settembre</i>	275.6	264.5	956.0	
<i>Ottobre</i>	202.4	194.4	688.5	
<i>Novembre</i>	101.5	94.67	328.7	
<i>Dicembre</i>	98.07	92.56	316.4	
<i>Totale</i>	3030	2996	10655	

6.6.5. Esempi applicativi: risultati elettrici di un sistema line –

focus con batterie

La valutazione delle prestazioni di un sistema a concentrazione oltre a dipendere dalle variabili interne all'impianto, si può legare a particolari scelte relative alla connessione in rete. In questa sezione, a partire da una configurazione line – focus, con circa 500 celle ed un fattore di concentrazione pari a 150, si analizza la producibilità elettrica del sistema per differenti giornate, caratterizzate da condizioni meteorologiche variabili.

In particolare, una volta definiti consumi e producibilità, si osserva come aumentare la quota parte di energia elettrica auto – consumata, tramite l'impiego di una batterie. Si premette che le valutazioni riportate, sono unicamente di tipo energetico.

In Figura VI.71, a partire dalle caratteristiche dell'impianto definite in precedenza, si confronta la producibilità per una giornata estiva, una

Capitolo 6

invernale ed una nuvolosa, con i consumi elettrici medi giornalieri di un'utenza al Sud Italia.

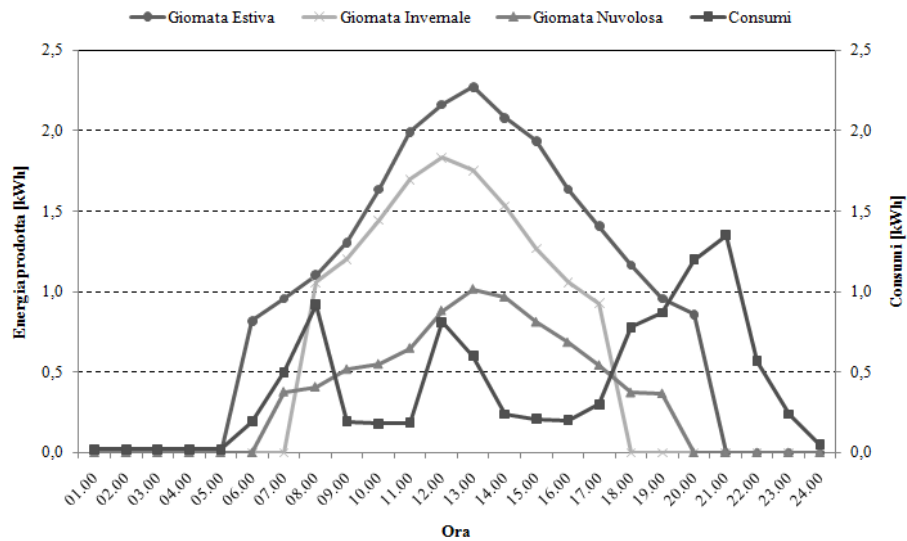
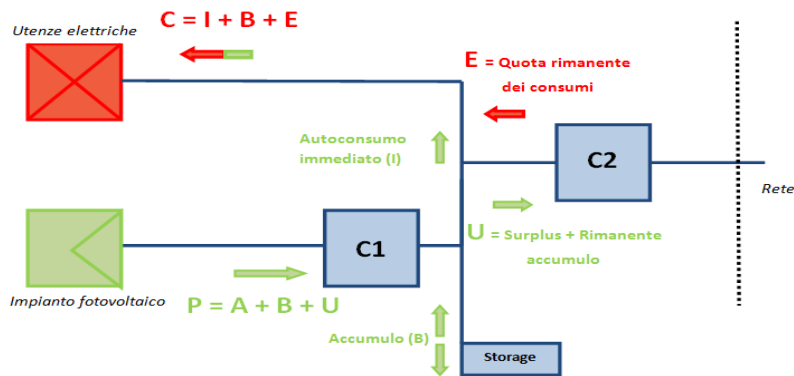


Figura VI.71 Producibilità e consumi giornalieri in varie condizioni

La stima della producibilità è stata possibile grazie all'impiego delle reti neurali, sfruttando differenti condizioni di nuvolosità. Si può notare come parte dell'energia prodotta sia immessa in rete e parte auto – consumata, a seconda della giornata. In particolare, le percentuali di auto – consumo sono del 72%, 55%, 39%, rispettivamente per la giornata estiva, invernale e nuvolosa. Considerando un parco batterie che consenta lo stoccaggio di parte di energia, si può aumentare la quota di auto – consumo.



P = Energia prodotta dall'impianto fotovoltaico
E = Energia prelevata dalla rete
U = Energia prodotta dall'impianto fotovoltaico ed immessa in rete
C = Energia consumata dalle utenze

Figura VI.72 Schema di connessione con accumulo

In Figura VI.72 è indicato lo schema di connessione dell'impianto alla rete con la presenza di un sistema di accumulo.

In questo caso, si fa l'ipotesi di poter immagazzinare tutta l'energia in eccesso, mentre si considera un rendimento medio della batteria del 75%.

Attraverso tale configurazione, l'auto – consumo per la giornata estiva ed invernale arriva al 100%, mentre nella giornata nuvolosa si ferma a circa l'85%. Tale risultato è importante in quanto permette maggiori vantaggi economici. Infatti, la maggior parte della valorizzazione economica dell'energia prodotta è proprio dovuta alla parte auto – consumata e quindi non richiesta alla rete. In questo caso, per un'analisi specifica che consideri una simulazione su tutto l'anno, vanno analizzati i costi della batteria per valutare la reale convenienza economica.

6.6.6. Esempi applicativi: funzionamento del serbatoio

In questa sezione si descrive il comportamento del serbatoio connesso all'utenza. In particolare, abbiamo osservato due possibili funzionamenti del serbatoio, cogenerativo per acqua calda sanitaria (ACS) e riscaldamento e trigenerativo, considerando anche la refrigerazione estiva.

In questa fase, a partire dal modello multinodo descritto, si osserva la stratificazione delle temperature all'interno del serbatoio. Molto interessante è osservare che l'input al serbatoio deriva dal modello di temperature del fluido termo – vettore realizzato in Ansys. In particolare, conoscendo temperature e portate del fluido nel circuito primario, che porta l'acqua al serbatoio, possiamo osservare l'andamento della temperatura nell'accumulo a seconda delle richieste.

A partire dal modello di dimensionamento del serbatoio e considerando le taglie disponibili sul mercato, si è scelto un serbatoio con un volume di 1500 l, nel caso cogenerativo, ed uno di 2500 l nel caso trigenerativo.

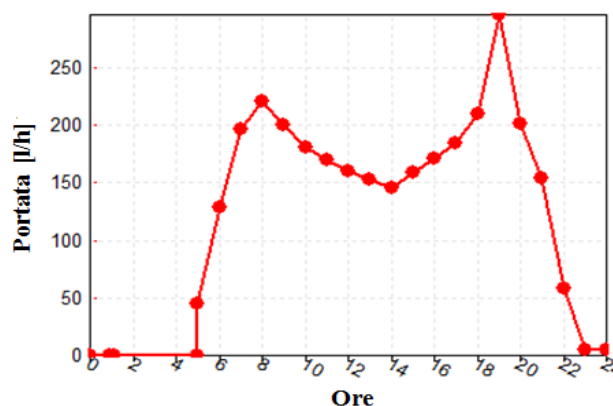


Figura VI.73 Consumi invernali per ACS e riscaldamento in l/h

Capitolo 6

Considerando il caso cogenerativo, riportiamo in Figura VI.73 le possibili richieste dell'utenza in termini di portata di fluido termo – vettore per ACS e riscaldamento. In particolare, si è fissata la temperatura per lo spillamento di acqua calda dal serbatoio per il riscaldamento, dalla parte alta, a 65 °C. La richiesta complessiva per la giornata invernale è di 4.2 kWh per ACS e 84 kWh per il riscaldamento.

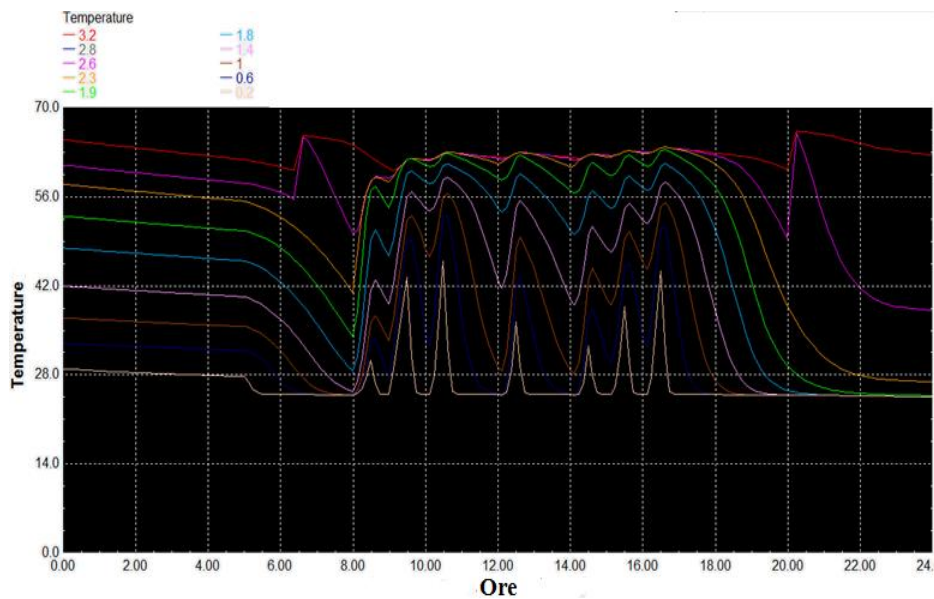


Figura VI.74 Stratificazione nel serbatoio per ACS e riscaldamento

Sfruttando il sistema line – focus, ipotizzando la temperatura della cella a 70°C, che come visto porta ad una temperatura del fluido termo – vettore di circa 66°C, l'andamento della stratificazione nel serbatoio è riportato in Figura VI.74, in funzione dell'altezza del serbatoio, con un'altezza massima di 3.2 m.

La linea rossa è la temperatura del serbatoio a 3.2 metri e cioè quasi all'apice del serbatoio da cui avviene lo spillamento dell'acqua calda utilizzata per il riscaldamento. Le richieste iniziali, visto che il CPV/T entra in funzione alle 8, vengono soddisfatte grazie all'integrazione della caldaia nella serata precedente. Per questo motivo si vede un forte innalzamento della temperatura nella parte alta del serbatoio, dove è posto l'ingresso di quest'ultima. Dalle 8 il sistema è operativo e quando avviene lo scarico dal CPV/T si vede che si innalza la temperatura, soprattutto nella parte inferiore, dove il fluido entra il contatto con il serbatoio.

Il fluido caldo risale creando la stratificazione che si mantiene per tutta la durata della giornata. E' ancora interessante osservare il comportamento del serbatoio nella parte finale della giornata dove vi sono ancora presenti delle richieste di ACS e di riscaldamento ma il sistema non può essere più

operativo. Ecco che entra in gioco l'accumulo che soddisfa le richieste fino alle 20, quando la caldaia per ristabilire il set point di temperatura.

Lo stesso discorso si può ripetere per il caso trigenerativo. In questa situazione, tuttavia, il set point per un'AHP monostadio è posto a 90°C ed il sistema, non riesce a coprire durante la giornata le richieste complessive di ACS e refrigerazione, considerando sempre una temperatura della cella di 70°C. Tuttavia, con un fattore C maggiore, le temperature aumentano ed è possibile pensare al soddisfacimento delle richieste.

6.6.7. Il caso della manutenzione

La valutazione del sistema CPV/T dal punto di vista energetico – economico, deve tener conto delle sue possibili cause di inoperatività. Come descritto nel Capitolo 4, infatti, tali sistemi, soprattutto per il fatto che non si tratta di impianti standard e quindi, già commercializzati, possono presentare malfunzionamenti non subito riconoscibili. Il costo di inefficienza dell'impianto incide sull'energia prodotta e sull'analisi economica.

La procedura FMECA descritta prevede che, dato un certo impianto, si definiscano le criticità e si sanciscano i tempi di non funzionamento al fine di stimare il danno energetico e le conseguenze economiche.

Nell'esempio riportato in questa sezione (Renno et al., 2016a), si considera un impianto point – focus con ottiche riflettive e 3 moduli da 60 celle a tripla giunzione. Si tiene conto, inoltre, di una pompa di circolazione per modulo ed una generale di mandata al serbatoio, di un inverter ed un sistema di inseguimento biassiale con due motori, uno Est – Ovest e l'altro Nord – Sud.

Tabella VI.12 Esempio analisi FMECA (parte 1)

Componente	Danno	Quantità	Frequenza (rotture/ anno)	Effetto
<i>Serbatoio</i>	rottura	1	0.33	Blocco termico
<i>Pompa (generale)</i>	rottura	1	0.33	Blocco totale
<i>Pompa (moduli)</i>	rottura	3	0.66	Blocco modulo
<i>Inverter</i>	rottura	1	0.33	Blocco totale
<i>Inseguitore (N – S)</i>	rottura	1	0.33	Perdite 20%
<i>Inseguitore (E – O)</i>	rottura	1	0.33	Blocco totale
<i>Celle</i>	rottura	180	8.66	Blocco modulo
<i>Ottica 1</i>	rottura	180	3	Blocco modulo
<i>Ottica 2</i>	pulizia	180	4	Riduzione η

Capitolo 6

In Tabella VI.12 e VI.13 sono riportati, per ciascun componente i risultati dell'analisi FMECA, in merito allo studio delle criticità rilevate.

Tabella VI.13 Esempio analisi FMECA (parte 2)

Componente	MTBF (h)	MTTR (h)	t_{nf} (h/anno)	Blocco elettrico (h/anno)	Blocco termico (h/anno)
<i>Serbatoio</i>	7018	12.69	4.18	0	4.18
<i>Pompa (generale)</i>	7018	12.69	4.18	4.18	4.18
<i>Pompa (moduli)</i>	10527	12.69	2.79	2.79	2.79
<i>Inverter</i>	7018	31.73	10.42	10.42	10.42
<i>Inseguitore (N – S)</i>	7018	12.69	4.18	0.84	0.84
<i>Inseguitore (E – O)</i>	7018	12.69	4.18	4.18	4.18
<i>Celle</i>	48139	12.69	0.61	36.26	36.26
<i>Ottica 1</i>	138960	12.69	0.21	12.56	12.56
<i>Ottica 2</i>	-	-	33.58	33.58	33.58

In particolare, per ciascun componente sono evidenziati la causa del danno, la frequenza di eventi all'anno, gli effetti sul sistema, i tempi di non funzionamento specifici (t_{nf}).

Inoltre, a partire dai tempi di non funzionamento di ciascun componente e considerando gli effetti che esso ha sul sistema, si riportano i tempi di non producibilità elettrica e termica.

Considerando l'analisi riportata, in funzione della producibilità media giornaliera, si può ottenere il danno energetico ed economico (costo di inefficienza) dovuta a ciascun componente, come riportato in Tabella VI.14.

Come si può osservare, il componente che causa maggiori perdite energetiche e che quindi ha maggiore impatto sulla parte economica è la cella. In particolare, si rilevano problemi di surriscaldamento che portano alla presenza di hotspot. Ciò conduce prima ad una progressiva riduzione del rendimento e, poi, alla rottura.

Considerando i costi di inefficienza, la manodopera necessaria per gli interventi ed il costo dei componenti da sostituire, come visto nel Capitolo 4, l'analisi di manutenzione conduce ad una nuova stima economica.

In questo caso, i flussi di cassa annui si riducono per la presenza di tali costi aggiuntivi.

In Figura VI.75 è possibile osservare il SPB in questa nuova configurazione, confrontandolo con il caso senza analisi di manutenzione.

Tabella VI.14 *Danno energetico e costi di inefficienza*

Componente	Perdite elettriche (kWh/anno)	Perdite Termiche (kWh/anno)	Costo di inefficienza (€/anno)
Serbatoio	0	14.5	€ 1.01
Pompa (generale)	7.51	14.5	€ 2.82
Pompa (moduli)	5.01	9.65	€ 1.88
Inverter	18.7	36.1	€ 7.02
Inseguitore (N – S)	1.50	2.89	€ 0.56
Inseguitore (E – O)	7.51	14.5	€ 2.82
Celle	65.1	125.5	€ 24.4
Ottica 1	22.6	43.5	€ 8.46
Ottica 2	60.3	116.2	€ 22.6

Come si può osservare, il SPB aumenta in media di circa 2.5 anni rispetto al caso precedente. L'analisi riportata (Renno et al., 2016a) può essere ripetuta per qualsiasi tipo di sistema a concentrazione.

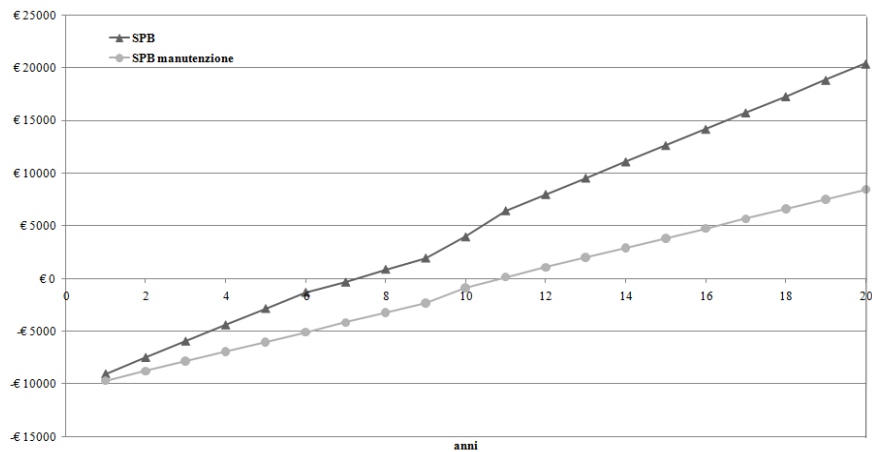


Figura VI.75 *SPB nel caso della manutenzione*

6.6.8. Impatto ambientale

L'ultima analisi riportata, in termini di applicazioni del sistema CPV/T, riguarda le emissioni di CO₂ evitate. In particolare, considerando specifici carichi per l'utenza, si confronta l'energia primaria richiesta da un sistema tradizionale rispetto al sistema proposto. In base a tali valutazioni è possibile stimare il CUC e le emissioni evitate.

Tabella VI.15 Energia primaria ed emissioni evitate

Mese	Tradizionale			CPVT			Kg CO ₂
	E _{el,pr} (kWh)	E _{t,pr} (kWh)	E _{fr,pr} (kWh)	E _{el,pr} (kWh)	E _{t,pr} (kWh)	E _{fr,pr} (kWh)	
Gennaio	722	2887	0	0	2265	0	281
Febbraio	593	2611	0	0	1913	0	270
Marzo	722	2554	0	0	1580	0	354
Aprile	572	340	0	0	0	0	191
Maggio	591	338	0	0	0	0	194
Giugno	572	315	461	0	0	0	282
Luglio	591	316	981	0	0	0	394
Agosto	591	312	981	0	0	0	394
Settembre	699	306	461	0	0	0	306
Ottobre	722	325	0	0	0	0	219
Novembre	699	328	0	0	0	0	214
Dicembre	722	2877	0	0	2277	0	276
Totale	7795	13509	2885	0	8035	0	3376

In Tabella VI.15, in funzione dei carichi medi mensili, osservati in precedenza, è indicata l'energia primaria mensile richiesta al sistema tradizionale ed al CPV/T. Inoltre si possono osservare le emissioni evitate in termini di kg di CO₂.

Il sistema proposto permette il risparmio di circa 3400 kg di CO₂ annui e presenta un CUC pari a 2.75, rispetto a quello tradizionale pari a 0.75 (Renno et al., 2016a).

I sistemi a concentrazione quindi si propongono come un'ottima soluzione in termini di impatto ambientale. Tali stime sono confermate anche attraverso analisi di "Life Cycle Assessment" (LCA) (De Feo et al., 2016).

6.7. Conclusioni sui risultati

I risultati presentati permettono in primo luogo di valutare la bontà dei modelli elaborati, soprattutto in virtù del confronto con l'analisi sperimentali. Inoltre, consentono di validare le capacità dei sistemi a concentrazione come soluzioni di sistemi rinnovabili innovativi. Infatti, si sono osservate ottime potenzialità sia per la produzione di energia elettrica che termica. Tali sistemi, infine, presentano un'elevata flessibilità nella configurazione che li rende utili per differenti applicazioni.

Conclusioni

Conclusioni

La ricerca di nuove soluzioni, nel settore delle energie rinnovabili, vede come principale matrice di analisi lo studio di alternative che consentano la produzione combinata di energia. In questo contesto, le elevate potenzialità della fonte solare hanno condotto all'analisi di sistemi termo – fotovoltaici a concentrazione.

Lo studio presentato in questo lavoro, pertanto, ha analizzato in ogni suo aspetto la tematica dei sistemi a concentrazione. L'obiettivo è stato quello di modellare sia teoricamente che con il supporto dell'analisi sperimentale, il funzionamento di un sistema di questo tipo. In particolar modo, non ci si è riferiti ad un particolare impianto ma, attraverso le varie simulazioni, si è svolta un'analisi parametrica che permettesse di comprendere l'influenza di ciascuna variabile, interna o esterna, sul sistema. In tal senso, è stato possibile adattare il funzionamento dell'impianto con varie configurazioni e valutarne le potenzialità elettriche e termiche a seconda dell'applicazione.

Un sistema termo – fotovoltaico a concentrazione è composto da tre parti principali, l'ottica che permette di focalizzare la luce, il ricevitore, dove sono alloggiati le celle multi – giunzione e che include il sistema di recupero del calore e l'inseguitore. Le celle scelte sono a tripla giunzione, in particolar modo sono state analizzate sperimentalmente le caratteristiche di celle di fosforo di Indio – Gallio, arseniuro di Gallio e Germanio (InGaP/GaAs/Ge).

Sono stati valutati i principali parametri di un impianto a concentrazione, tra cui il fattore di concentrazione che descrive di quanto venga amplificata la radiazione incidente sulla cella, l'angolo di accettazione che incide sull'inseguimento e sulla corretta focalizzazione e la configurazione. Quest'ultima descrive come le celle e le ottiche sono disposte le une rispetto alle altre. In particolare sono state discusse tre principali varianti: point – focus, line – focus e dense array. Anche l'ottica è stata studiata in dettaglio, suddividendo tra dispositivi rifrattivi come le lenti di Fresnel e dispositivi riflessivi come gli specchi. La scelta di configurazione ed ottica ha permesso di approfondire differenti soluzioni.

Il punto di forza di tali sistemi è il raffreddamento attivo delle celle in modo, sia da garantire il mantenimento delle loro prestazioni elettriche che da ottenere energia termica.

Pertanto, nel primo capitolo si sono descritti i sistemi a concentrazione osservandone i componenti, i punti di forza e descrivendo quanto presente in letteratura.

Nel Capitolo 2, si è impostata l'analisi definendo tutte le parti da modellare e gli strumenti da impiegare per raggiungere l'obiettivo di valutazione complessiva di tali impianti. In particolare, i sistemi sono stati modellati teoricamente considerando tutte le fasi di analisi a partire dall'input e passando per la parte di producibilità elettrica e termica. Le principali variabili di simulazione sono state il fattore di concentrazione, il

tipo di ottica, la disposizione, il numero di celle e le condizioni esterne. Particolare attenzione è stata rivolta allo studio sperimentale che ha avuto un duplice ruolo, da un lato ha permesso di analizzare l'incidenza di alcuni fattori, non direttamente rilevabile teoricamente. Dall'altro lato, invece, ha consentito, tramite il sistema di misura allestito, di costruire un database di rilevazioni, fondamentali per differenti modelli come quello di Random Forest per la valutazione della temperatura della cella, oppure quelli alle reti neurali. In questo senso, nel Capitolo 3, al fine di valutare le prestazioni dell'impianto in ogni condizione, è stata definita una procedura per la stima del potenziale solare attraverso le reti neurali. In particolare, dato che i sistemi a concentrazione operano solo con la componente diretta della radiazione, si è fatta particolare attenzione al modello di tale componente della radiazione globale. Sono state definite due reti, una per la radiazione globale ed una per la diretta. Dopo un'attenta analisi delle variabili input ed un processo di ricombinazione, la prima rete è stata costruita considerando sette parametri di input tra cui: latitudine e longitudine ore di luce, declinazione solare. Tale rete presenta uno strato nascosto con dieci neuroni ed impiega funzioni di trasferimento dei dati sia sigmoidi che lineari. La rete per la radiazione diretta, invece, presenta quattro input principali tra cui la stessa radiazione globale e l'indice di chiarezza, che descrive le condizioni di nuvolosità. Tale rete prevede uno strato nascosto con 5 neuroni e le stesse funzioni di trasferimento della prima rete. Tali modelli sono stati addestrati, validati e testati con dati per vari anni, impiegando misure di database nazionali e prove sperimentali. Le reti valutate statisticamente e confrontate con la letteratura hanno offerto ottimi risultati in termini di errore medio sulla predizione. Tali modelli hanno permesso, poi, di implementare un'app mobile per la valutazione del potenziale solare a Salerno.

Nel Capitolo 4 sono stati descritti tutti i modelli per la valutazione delle prestazioni energetiche dell'impianto. In particolar modo, si è osservato come valutare la producibilità elettrica, a partire dalle prestazioni delle celle e dalle configurazioni scelte. Grande attenzione è stata posta sui modelli per la valutazione della temperatura della cella. In questo senso, tale variabile influenza sia la parte elettrica che quella termica. Il culmine di tale analisi è stata la costruzione di un modello tipo Random Forest che ha permesso di prevedere la temperatura al variare della concentrazione, della temperatura ambiente e della radiazione incidente. In questo caso è stata fondamentale, come per i modelli alle reti neurali, l'impiego di dati sperimentali raccolti sul campo. La valutazione delle prestazioni termiche dell'impianto ha avuto, invece, come principale elemento di analisi la temperatura del fluido termovettore. A seconda di concentrazione e numero di celle sono stati definiti due circuiti di raffreddamento, uno basato su uno schema point – focus, l'altro su una configurazione line – focus. Sfruttando software grafici come Catia e SolidWorks e implementando l'analisi numerica in Ansys è stato possibile osservare i tempi di risposta di ciascun impianto e le temperature raggiunte

Conclusioni

dal fluido. In questo senso, si è impiegata una soluzione di acqua e glicole in un circuito con un diametro interno di 4.2 cm e celle a tripla giunzione da 1 cm. I modelli in regime transitorio, hanno permesso di valutare la configurazione line – focus come più efficiente sia per i tempi di risposta che per le temperature raggiunte. Anche in questo caso, parte delle simulazioni hanno considerato come input ai modelli termici, temperature della cella valutate sperimentalmente. L'ultima fase modellistica, infine, ha analizzato la connessione del sistema a concentrazione ad un'utenza domestica, definendo il funzionamento di un possibile serbatoio che fungesse da accumulo per l'energia termica. In questa fase, si sono svolte anche analisi di inefficienza a partire da una prestabilita configurazione e sono state analizzate le potenzialità energetico – economiche degli impianti a concentrazione, in varie condizioni.

Nel Capitolo 5 è stata presentata l'analisi sperimentale svolta. In primo luogo è stato descritto un sistema a concentrazione realizzato all'Università degli Studi di Salerno. Tale sistema sfrutta una configurazione point – focus con una lente di Fresnel dal diametro di 30 cm, un caleidoscopio come ottica secondaria, ed una cella a tripla giunzione. Attraverso tale apparato sono state valutate differenti configurazioni al fine di definire una procedura sperimentale per la valutazione del fattore di concentrazione. In modo particolare, variando l'altezza della lente e valutando le tensioni di corto circuito della cella, è stato, di volta in volta, calcolato un fattore di concentrazione. In questo modo la cella è stata caratterizzata sperimentalmente al variare di C, osservando tutti i suoi parametri come: tensione di circuito aperto, Fill Factor, rendimento, resistenza serie e resistenza di shunt. Si è ottenuta una concentrazione massima di 310x con un'altezza della lente di circa 24 cm. Tramite tali impostazioni, si è osservato il funzionamento reale dell'impianto per differenti condizioni. Le prove hanno riguardato differenti campagne sperimentali, considerando un orizzonte temporale di due anni.

La fase sperimentale ha, in parallelo, previsto la definizione di una strumentazione di misura che permettesse da un lato di monitorare le prestazioni dell'impianto e dall'altro di raccogliere misure utili ai modelli teorici. In modo particolare, sono state impiegate diverse termo – resistenze, un piranometro, un sistema di acquisizione per la raccolta dei dati dai sensori ed il monitoraggio dei segnali elettrici ed una Source Meter Unit per imporre una tensione variabile in sede di caratterizzazione della cella.

L'ultima fase di studio sperimentale ha permesso di progettare un nuovo impianto di tipo line – focus, con un fattore di concentrazione intorno ai 100x, lanciato in produzione a Novembre 2016.

Nel Capitolo 6, tutti i risultati della modellazione teorico – sperimentale sono stati riportati, considerando tutte le variabili di simulazione indicate. Si è osservato come le reti neurali permettessero una ottima previsione della radiazione sia globale che diretta e, pertanto hanno rappresentato l'input per

la valutazione energetica degli impianti. Sono, inoltre, stati riportati i risultati delle analisi elettriche e termiche, evidenziando le ottime potenzialità dei sistemi a concentrazione. In modo particolare, considerando un'applicazione domestica, tramite un modello di scelta si è giunti alla definizione di un sistema point – focus con 180 celle disposte in tre moduli ed un fattore di concentrazione elevato. In questa configurazione, il sistema risponde ai carichi dell'utenza, sfruttando sia la rete elettrica che il serbatoio di accumulo. Altri esempi di applicazioni, hanno mostrato l'analisi di un sistema line – focus, con circa 500 celle. Anche in questo caso, il sistema risponde alle richieste dell'utenza ed, in modo particolare, per tale configurazione è stata analizzata anche la presenza di una batteria.

I risultati dell'analisi sperimentale, mostrano che con un fattore massimo di 310x, la temperatura della cella ha superato, talvolta, i 70°C. Ciò quindi ha reso possibile un'analisi parametrica della temperatura, anche tramite il modello di Random Forest, che evidenzia come, all'aumentare della concentrazione, il sistema possa essere impiegato sia per il riscaldamento invernale che per la refrigerazione estiva. Chiaramente, il sistema, soprattutto nel periodo invernale, richiede l'integrazione di una caldaia. In riferimento ad un'utenza domestica, e considerando una specifica configurazione point – focus, si è potuto esaminare anche un'analisi di inefficienza che ha indicato come la strada della manutenzione preventiva sia fondamentale per ridurre i costi operativi dell'impianto. In generale, per un'utenza domestica situata al Sud Italia, il sistema a concentrazione permette una produzione di circa 3000 kWh elettrici annui e di 10000 – 13000 kWh termici. Chiaramente, considerando richieste medie, la possibilità di scambiare energia elettrica con la rete e l'impiego di un serbatoio con integrazione si può affermare che tali sistemi presentano ottime potenzialità per un'utenza domestica. Inoltre, si è analizzato come differenti configurazioni possano sopperire alle richieste, con un tempo medio di ritorno dell'investimento tra gli 8 e gli 11 anni, nel caso di inefficienze irrisolte.

Il lavoro presentato, quindi mostra le grandi potenzialità dei sistemi a concentrazione nell'ambito della produzione combinata di energia. L'analisi teorica e sperimentale si è incentrata sullo studio dell'influenza di ciascun parametro, caratteristico di tali tipi di impianti. In questo senso, i principali risultati sono connessi alla previsione dell'input, alla valutazione del funzionamento considerando celle, parte elettrica e termica, ed allo studio sperimentale dei sistemi al fine di progettare e realizzare diversi prototipi. Le applicazioni mostrate, pertanto, rappresentano un primo esempio di possibile impiego di tali sistemi per utenze di tipo generico.

In generale, quindi i sistemi a concentrazione rappresentano una soluzione alternativa interessante, che mostra elevata flessibilità nella configurazione e nella possibilità di continui sviluppi volti a definire uno standard.

Bibliografia

Bibliografia

Abolarin, S.M., Abadegesin, .O. G, Shitta, M.B., Yussuff, A., Eguma, C.A., Ehwerhemuepha, L., Adegbenro, O. (2013) A collective approach to reducing carbon dioxide emission: A case study of four University of Lagos Halls of residence. *Energy and Buildings*, 61, 318 – 322.

Al-Alili, A., Hwang, Y., Radermacher, R., Kubo, I. (2012) A high efficiency solar air conditioner using concentrating photovoltaic/thermal collectors. *Applied Energy*, 93, 138–147.

Aldegheri, F., Baricordi, S., Bernardoni, P., Brocato, M., Calabrese, G., Guidi, V., Mondardini, L., Pozzetti, L., Tonezzer, M., Vincenzi, D. (2014) Building integrated low concentration solar system for a self-sustainable Mediterranean villa: the Astonysshine house. *Energy and Buildings*, 77, 355–363.

Almonacid, F., Fernandez, E.F., Mallick, T.K., Perez-Higueras, P.J. (2015) High concentrator photovoltaic module simulation by neuronal networks using spectrally corrected direct normal irradiance and cell temperature. *Energy*, 84, 336–343.

Almonacid, F., Fernandez, E.F., Mallick, T.K., Perez-Higueras, P.J. (2015). High concentrator photovoltaic module simulation by neuronal networks using spectrally corrected direct normal irradiance and cell temperature. *Energy*, 1, 1 – 8.

Almonacid, F., Pérez-Higueras, P.J., Fernández, E.F., Rodrigo, P. (2012) Relation between the cell temperature of a HCPV module and atmospheric parameters. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 105, 322–327.

Amrouche, B. e X. Le Privert (2014) Artificial neural network based daily local forecasting for global solar radiation. *Applied Energy*, 130, 333 – 341.

ANSYS ® Academic Research, release 16.2, Help System, ANSYS Inc.

Apra, C. e C. Renno, (2002) A numerical approach to a very fast thermal transient in an air cooling evaporator. *Applied Thermal Engineering* , 22, 219 – 228.

Apra, C., Mastrullo, R., Renno C., (2004) An experimental analysis of a thermodynamic model of a vapour compression refrigeration plant on varying the compressor speed. *International Journal of Energy Research*, 28, 537 – 549.

Azadeh, A., Maghsoudi, A., Sohrabkhani, S. (2009) An integrated artificial neural networks approach for predicting global radiation. *Energy Conversion and Management*, 50, 1497 – 1505.

Beale, R. e T. Jackson (1980) Neural Computing: An Introduction. *Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia*.

Behrang, M.A., Assareh, E., Ghanbarzadeh, A., Noghrehabadi, A.R. (2010) The potential of different artificial neural network (ANN) technique in daily global solar radiation modeling based on meteorological data. *Solar Energy*, 84, 1468 – 1480.

Ben-Daya, M., and A. Raouf. (1996) A revised failure mode and effects analysis model. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 13, 43 – 47.

Benghanem, M. e A. Mellit (2010) Radial Basis Function Network-based prediction of global solar radiation data: application for sizing of a stand-alone photovoltaic system at Al-Madinah, Saudi Arabia. *Energy*, 35, 3751 – 3762.

Benghanem, M. e A.A. Joraid (2007) A multiple correlation between different solar parameters in Medina, Saudi Arabia. *Renewable Energy*, 14, 2424 – 2435.

Bilgili, M. e M. Ozgoren (2011) Daily total global solar radiation modeling from several meteorological data. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 112, 125 – 138.

Bishop, C. M. (1995) *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press.

Braun, A., Hirsch, B., Vossier, A., Katz, E.A., Gordon, J.M., (2013) Temperature dynamics of multi junction concentrator solar cells up to ultra-high irradiance. *Progress in Photovoltaics and Research Applications*, 21, 202–8.

Breiman, L. (2001) Random forests. *Machine Learning*, 45, 5 – 32.

Brogen, M. (2004) Optical Efficiency of Low-Concentrating Solar Energy Systems with Parabolic Reflectors. Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala (Sweden,) Ph.D. Thesis.

Brown, G., Wyatt, Harris, J., Yao, R.X. (2005) Diversity creation methods: a survey and categorization. *Information Fusion*, 6, 5 – 20.

Calabrese, G., Gualdi, F., Baricordi, S., Bernardoni, P., Guidi, V., Pozzetti, L., et al. (2014) Numerical simulation of the temperature distortions in InGaP/GaAs/Ge solar cells working under high concentrating conditions due to voids presence in the solder joint. *Solar Energy*, 103, 1–11.

Caleffi, M. *Idraulica – Le perdite di carico negli impianti*. Poligrafica Moderna S.p.A., Novara, Giugno 2005.

Campania Region Study; Available online; <http://www.sito.regione.campania.it/agricoltura/meteo/agrometeo>, (accessed 16.12.14).

Carmignani, G. (2009). An integrated structural framework to cost-based FMECA: The priority-cost FMECA. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 861–871.

CATIA: Dassault Systems. <http://www.3ds.com/products-services/catia>.

Bibliografia

- Celik, A.N. e T. Muneer (2012) Neural network based method for conversion of solar radiation data. *Energy Conversion and Management*, 51, 117 – 124.
- Celik, O., Teke, A., Basak Yldirim, H. (2016) The optimized artificial neural network model with Levenberg – Marquardt algorithm for global solar radiation estimation in Eastern Mediterranean Region of Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 116, 1 – 12.
- Ceylan, I., Gürel, A.E., Ergün, A., Tabak, A. (2016) Performance analysis of a concentrated photovoltaic and thermal system. *Solar Energy*, 129, 217–223.
- Chaoqing, F., Hongfei, Z., Rui, W., Xinglong, M. (2016) Performance investigation of a concentrating photovoltaic/thermal system with transmissive Fresnel solar concentrator. *Energy Conversion and Management*, 111, 401–408.
- Chemisana, D. (2011) Building integrated concentrating photovoltaics: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 603–661.
- Chemisana, D., Vossier, A., Pujol, L., Perona, A., Dollet, A. (2011) Characterization of Fresnel lens optical performances using an opal diffuser. *Energy Conversion and Management*, 52, 658–663.
- Chen, S.X., Gooi, H.B., Wang, M.Q. (2013) Solar radiation forecast based on fuzzy logic and neural networks. *Renewable Energy*, 60, 195 – 201.
- Cotal, H., Fetzer, C., Boisvert, J., Kinsey, G., King, R., Hebert, P.H., Yoon, Karam, N. (2009) III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics. *Energy Environmental Science*, 2, 174–192.
- CTI – Comitato Termotecnico Italiano, UNI/TS 11300-2: *Prestazioni energetiche degli edifici. Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali*, UNI, Ottobre 2014.
- De Feo, G., Forni, M., Petito, C., Renno, C. (2016) Life cycle assessment and economic analysis of a low concentrating photovoltaic system. *Environmental Technology*, 37, 2473 – 2482.
- De Kersauson, M., Jakomin, R., El Kurdi, M., Beaudoin, G., Zerounian, N., Aniel, F., et al. (2010) Direct and indirect band gap room temperature electroluminescence of Ge diodes. *Journal of Applied Physics*, 108, 023105.
- DOCET, <http://www.docet.itc.cnr.it/>, ENEA.
- DT80 Series 3 Data Logger, *Intelligent Data*, Logging Products, (available on www.datataker.com/DT80).
- Fernández, E.F., Almonacid, F., Rodrigo, P., Pérez-Higueras, P. (2014) Calculation of the cell temperature of a high concentrator photovoltaic (HCPV) module: A study and comparison of different methods. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 121, 144–151.

- Fernandez, I.B., Zanakis, S.H., Walczak, S. (2002) Knowledge discovery techniques for predicting country investment risk. *Computer & Industrial Engineering*, 43, 787 – 800.
- Gairaa, K., Khellaf, A., Messlem, Y., Chellali, F. (2016) Estimation of the daily global solar radiation based on BoxeJenkins and ANN models: a combined approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 238 – 249.
- García-Domingo, B., Piliouline, M., Elizondo, D., Aguilera, J. (2015) CPV module electric characterization by artificial neural networks. *Renewable Energy*, 78, 173 – 181.
- Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E.D. (2016) Solar cell efficiency tables (version 47). *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, 24, 3–11.
- Gueymard, C.A., Stephen, M., Wilcox, S.M. (2011) Assessment of spatial and temporal variability in the US solar resource from radiometric measurements and predictions from models using ground-based or satellite data. *Solar Energy*, 85, 1068 – 1084.
- Hasni, A., Sehli, A., Draoui, B., Bassou, A., Amieur, B. (2012) Estimating global solar radiation using artificial neural network and climate data in the south-western region of Algeria. *Energy Procedia*, 18, 531 – 537.
- Imtiaz Hussain, M. e G.H. Lee (2015) Experimental and numerical studies of a U-shaped solar energy collector to track the maximum CPV/T system output by varying the flow rate. *Renewable Energy*, 76, 735 – 742.
- Ishibashi, K., Kimura, Y., Niwano, M. (2008) An extensively valid and stable method for derivation of all parameters of a solar cell from a single current-voltage characteristic. *Journal of Applied Physics*, 103, 094507.
- Kalogirou, S.A. (2001) Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 5, 373 – 401.
- Kambezidis, H.D., Psiloglou, B.E., Karagiannis, D., Dumka, U.C., Kaskaoutis, D.G. (2016) Recent improvements of the Meteorological Radiation Model for solar irradiance estimates under all-sky conditions. *Renewable Energy*, 93, 142 – 158.
- Kandilli, C. (2013) Performance analysis of a novel concentrating photovoltaic combined system. *Energy Conversion and Management*, 67, 186–196.
- Kasten, F., e A.T., Young (1989) Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics*, 28 (22), 4735 – 4738.
- Kaushika, N.D., Tomar, R.K., Kaushik, S.C. (2014) Artificial neural network model based on interrelationship of direct, diffuse and global solar radiations. *Solar Energy*, 103, 327 – 342.
- Kerzman, T. e L. Schaefer (2012) System simulation of a linear concentrating photovoltaic system with an active cooling system. *Renewable Energy*, 41, 254–261.

Bibliografia

- Khatib, T., Mohamed, A., Sopian, K., Mahmoud, M. (2012) Solar energy prediction for Malaysia using artificial neural networks. *International Journal of Photoenergy*, 12, 16.
- Kheradmand, S., Nematollahi, O., Reza Ayoobi, A. (2016) Clearness index predicting using an integrated artificial neural network (ANN) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1357 – 1365.
- Kinsey, G.S., Hebert, P., Barbour, K.E., Krut, D.D., Cotal, H.L., Sherif, R.A. (2008). Concentrator multifunction solar cell characteristics under variable intensity and temperature. *Progress in Photovoltaic: Research and Application*, 16, 503–508.
- Kosmadakis, .G., Manolakos, D., Papadakis, G. (2011) Simulation and economic analysis of a CPV/thermal system coupled with an organic Rankine cycle for increased power generation. *Solar Energy*, 85, 308–324.
- Kribus, A., Kaftori, D., Mittelman, G., Hirshfeld, A., Flitsanov, Y., Dayan, A. (2006) A miniature concentrating photovoltaic and thermal system. *Energy Conversion and Management*, 47, 3582 – 3590.
- Kucuksille, E.U., Selbas, R., Sencan, A. (2011) Prediction of thermodynamic properties of refrigerants using data mining. *Energy Conversion and Management*, 52, 836 – 848.
- Kumar, R., Aggarwal, R.K., Sharma, J.D. (2013) Energy analysis of a building using artificial neural network: a review. *Energy and Buildings*, 65, 352 – 358.
- Kurtz S., (2009) Opportunities and challenges for development of a mature concentrating photovoltaic power industry, in: U.S. Department of Energy. Technical Report, NREL/TP-520-43208, U.S. Department of Energy.
- Lahouar, A. e J.B.H. Slama (2015) Day-ahead load forecast using random forest and expert input selection. *Energy Conversion and Management*, 103, 1040 – 1051.
- Landi, G., Henninger, M., Del Mauro, A., Borriello, C., Di Luccio, T., Neitzert, HC. (2013) Investigation of the optical characteristics of a combination of InP/ZnS-quantum dots with MWCNTs in a PMMA matrix. *Optical Materials*, 35, 2490–5.
- Lazzaroni, M., Ferrari, S., Piuri, V., Salman, A., Cristaldi, L., Faifer, M. (2015) Models for solar radiation prediction based on different measurement sites. *Measurement*, 63, 346 – 363.
- Li, M., Li, G.L., Ji, X., Yin, F., Xua, L. (2011) The performance analysis of the trough concentrating solar photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management*, 52, 2378 – 2383.
- Linares-Rodriguez, A., Ruiz-Arias, J.A., Pozo-Vazquez, D., Tovar-Pescador, J. (2013) An artificial neural network ensemble model for estimating global solar radiation from Meteosat satellite images. *Energy*, 61, 636 – 645.

- Lopez, G., Batlles, F.J., Tovar-Pescador, J. (2005) Selection of input parameters to model direct solar irradiance by using artificial neural networks. *Energy*, 30, 1675 – 1684.
- Loutzenhler, P.G., Manz, H., Felsmann, C., Strachan, P.A., Frank, T., Maxwell, G.M. (2007) Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *Solar Energy*, 81, 254 – 267.
- Luque, A., Sala, G., Arboiro, J.C. (1998). Electric and thermal model for non-uniformly illuminated concentration cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 51, 269 – 290.
- Macera, L. (1990) Reti Neurali e Pattern Recognition - finalmente un cervello elettronico?. *MC Microcomputer*, 102., 210 – 213.
- Mastrullo, R. e Renno, C. (2010) A thermoeconomic model of a photovoltaic heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 30, 1959 – 1966.
- MATLAB R2007b, *The MathWorks*, Inc., Massachusetts (United States).
- Meade, N. e T. Islam (2015) Modelling European usage of renewable energy technologies for electricity generation. *Technological Forecasting and Social Change*, 90, 497 – 509.
- Mellit, A., Eleuch, H., Benghanem, M., Elaoun, C., Massi Pavan, A. (2013) An adaptive model for predicting of global, direct and diffuse hourly solar irradiance. *Energy Conversion and Management*, 67, 117 – 124.
- Meng, X., Sellami, N., Knox, A.R., Montecucco, A., Siviter, J., Mullen, P., et al. (2016) A novel absorptive/reflective solar concentrator for heat and electricity generation: an optical and thermal analysis. *Energy Conversion and Management*, 114, 142–153.
- Mitchell, T. (1997). *Machine Learning*. McGraw Hill, p.2.
- Mittelman, G., Kribus, A., Dayan, A. (2007) Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems. *Energy Conversion and Management*, 48, 2481 – 2490.
- Mohanraj, M., Jayaraj, S., Muraleedharan, C. (2015) Applications of artificial neural networks for thermal analysis of heat exchangers - a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 90, 150 – 172.
- Mokri, A. e Emziane M. Concentrator photovoltaic technologies and market: a critical review. *World Renewable Energy Congress*, May 8–13 2011, Linköping (Sweden).
- Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K., Sharifi, A. (2009) A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1800 – 1818.
- Muneer, T. (2004) *Solar Radiation and Daylight Models*, Second edition Elsevier.

Bibliografia

Natarajan, S.K., Katz, M., Ebner, R., Weingaertner, S., Abländer, O., Cole, A., et al. (2012) Experimental validation of a heat transfer model for concentrating photovoltaic system. *Applied Thermal Engineering*, 34, 175–182.

Nixon, J.D., Dey, P.K., Davies, P.A. (2013) Design of a novel solar thermal collector using a multi-criteria decision-making methodology. *Journal of Cleaner Production*, 59, 150–159.

Noorian, A.M., Moradi, I., Kamali, G.A. (2008) Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. *Renewable Energy*, 33, 1406 – 1412.

Or, A.B., Appelbaum, J., 2014. Dependence of multi-junction solar cells parameters on concentration and temperature. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, 234–240.

Pérez-Higueras, P.J., Muñoz, E., Almonacid, G., Vidal, P.G. (2011) High concentrator photovoltaics efficiencies: present status and forecast. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1810–1815.

Polo, J., Ballestrín, J., Carra, E. (2016) Sensitivity study for modeling atmospheric attenuation of solar radiation with radiative transfer models and the impact in solar tower plant production. *Solar Energy*, 134, 219 – 227.

Qazi, A., Fayaz, H., Wadi, A., Raj, R.G., Rahim, N.A., Khan, W.A. (2015) The artificial neural network for solar radiation prediction and designing solar systems: a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 104, 1 – 12

Raugei, M. e P. Franklin (2009) Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks, *Energy*, 34, 392–399.

Renno, C., Petito, F., Gatto, A. (2015) Artificial neural network models for predicting the solar radiation as input of a concentrating photovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 106, 999–1012.

Renno, C. (2014) Optimization of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system used for a domestic application. *Applied Thermal Engineering*, 67, 396 – 408.

Renno, C. e M. De Giacomo (2014) Dynamic simulation of a CPV/T system using the finite element method. *Energies*, 7, 7395–414.

Renno, C. e F. Petito (2013) Design and modeling of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system for a domestic application. *Energy and Buildings*, 62, 392 – 402.

Renno, C. e F. Petito (2015) Choice model for a modular configuration of a point-focus CPV/T system. *Energy and Buildings*, 92, 55 – 66.

Renno, C. e F. Petito (2016) Experimental and theoretical model of a concentrating photovoltaic and thermal system. *Energy Conversion and Management*, 126, 516–525.

- Renno, C., Miranda, S., Petito, F. (2016 a) Inefficiencies analysis of a point – focus CPV/T system. *International Journal of Green Energy*, 13, 919 – 928.
- Renno, C., Petito, F., Gatto, A. (2016 b) ANN model for predicting the direct normal irradiance and the global radiation for a solar application to a residential building. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1298 – 1316.
- Renno, C., Petito, F., Landi, G., Nietzert, H.C. (2017) Experimental characterization of a concentrating photovoltaic system varying the light concentration. *Energy Conversion and Management*, Accepted Paper.
- Rodrigo, P., Fernández, E.F., Almonacid, F., Pérez-Higueras, P.J. (2014) Review of methods for the calculation of cell temperature in high concentration photovoltaic modules for electrical characterization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 478–488.
- Rubio, F., Martínez, M., Coronado, R., Pachón, J.L., Banda, P. Deploying HCPV powerplant—ISFOC experiences. Proc. of the 33rd *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2008.
- Sahin, M., Kaya, Y., Uyar, M. (2013) Comparison of ANN and MLR models for estimating solar radiation in Turkey using NOAA/AVHRR data. *Advanced Space Research*, 51, 891 – 904.
- Sfetsos, A. e A.H. Coonick (2000) Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques. *Solar Energy*, 68, 169 – 178.
- SolidWorks corporation, SolidWorks fundamentals, Schierstechnik, 2013.
- Steiner, M.A., Geisz, J.F., D Friedman, J., Olavarria, W.J., Duda, A., Moriarty, T.E. (2011) Temperature-dependent measurements of an inverted metamorphic multijunction (IMM) solar cell. In: *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, USA.
- Sueyoshi, T. e M. Goto (2014) Photovoltaic power stations in Germany and the United States: a comparative study by data envelopment analysis. *Energy Economics*, 42, 271–288.
- Teke, A., Yıldırım, H.B., Çelik, O. (2012) Evaluation and performance comparison of different models for the estimation of solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1097 – 1107.
- Theristis, M., Fernández, E.F., Stark, C., O'Donovan, T.S. (2016) A theoretical analysis of the impact of atmospheric parameters on the spectral, electrical and thermal performance of a concentrating III–V triple-junction solar cell. *Energy Conversion and Management*, 117, 218–27.
- Triple-junction solar cell for terrestrial applications, CTJ photovoltaic cell – 10 mm x 10 mm. *Datasheets Emcore*, Emcore Corporation, September 2012.
- Vossier, A., Chemisana, D., Flamant, G., Dollet, A. (2012) Very high fluxes for concentrating photovoltaic: considerations from simple experiments and modeling. *Renewable Energy*, 38, 31 – 39.

Bibliografia

Voyant, C., Muselli, M., Paoli, C., Nivet, M.L. (2013) Hybrid methodology for hourly global radiation forecasting in Mediterranean area. *Renewable Energy*, 53, 1 – 11.

Wang, Z., Wang, F., Su, S. (2011) Solar irradiance short-term prediction model based on BP neural network. *Energy Procedia*, 12, 488 – 494.

Wild, M., Folini, D., Henschel, F., Fischer, N., Muller, B. (2015) Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 116, 12 – 24.

Yacef, R., Benghanem, M., Mellit, A. (2012) Prediction of daily global solar irradiation data using Bayesian neural network: a comparative study. *Renewable Energy*, 48, 146 – 154.

Yadav, A.K. e S.S. Chandel (2012) Artificial neural network based prediction of solar radiation for Indian stations. *International Journal of Computer Applications*, 50, 1 – 4.

Yadav, A.K. e S.S. Chandel (2014) Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 772 – 781.

Yadav, A.K. e S.S. Chandel (2015) Solar energy potential assessment of western Himalayan Indian state of Himachal Pradesh using J48 algorithm of WEKA in ANN based prediction model. *Renewable Energy*, 75, 675 – 693.

Yadav, A.K., Malik, H., Chandel, S.S. (2014) Selection of most relevant input parameters using WEKA for artificial neural network based solar radiation prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 509 – 519.

Yadav, A.K., Malik, H., Chandel, S.S. (2015) Application of rapid miner in ANN based prediction of solar radiation for assessment of solar energy resource potential of 76 sites in Northwestern India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1093 – 1106 .

Yang, K. e C. Zuo (2015) A novel multi-layer manifold microchannel cooling system for concentrating photovoltaic cells. *Energy Conversion and Management*, 89, 214–221.

Yao, W., Li, Z., Xiu, T., Lu, Y., Li, X. (2015) New decomposition models to estimate hourly global solar radiation from the daily value. *Solar Energy*, 120, 87 – 99.

Zahedi, A. (2011) Review of modeling details in relation to low-concentration solar concentrating photovoltaic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1609–1614.

Zervas, P.L., Sarimveis, H., Palyvos, J.A., Markatos, N.C.G. (2008) Prediction of daily global solar irradiance on horizontal surfaces based on neural-network techniques. *Renewable Energy*, 33, 1796–1803.

Zhai, H., Dai, Y.J., Wu, J.Y., Wang, R.Z., Zhang, L.Y. (2010) Experimental investigation and analysis on a concentrating solar collector using linear Fresnel lens. *Energy Conversion and Management*, 51, 48–55.

Bibliografia

Zhang, D., Chai, Q., Zhang, X., He, J., Yuea, L., Dong, X., Wu, S. (2012) Economical assessment of large-scale photovoltaic power development in China. *Energy*, 40, 370–375.

Zhou , Z.H. (2003) Three perspectives of data mining. *Artificial Intelligence*, 143, 139 – 146.

Zilong, W., Hua, Z., Dongsheng, W., Wei, Z, Zhigang Z. (2017) Characterization of the InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell with a two-stage dish-style concentration system. *Energy Conversion and Management*, 76, 177–184.

Lista dei simboli

Lista dei simboli principali

NOMENCLATURA

A	area [m ²]
AM	air mass
ANN	artificial neural network
ARD	automatic relevance determination
b	bias
BP	back – propagation
C	concentrazione
C	calore specifico [kJ/kg K]
c _n	fattore di nuvolosità
CART	Classification and regression tree
CF	Cash flow
CPV	concentrating photovoltaic
CPV/T	concentrating photovoltaic and thermal
CUC	coefficiente utilizzo combustibile
cv	volume di controllo
d	diametro [mm]
DDP	differenza di potenziale [V]
DNI	direct normal irradiance [W/m ²]
DNT	direct network topology
DT	Data tracker
E	energia [Wh]
EL	elettroluminescenza
Fa	Fattore di attrito
FF	Fill Factor
G	radianza [W/m ²]
GNT	global network topology
GR	radiazione globale [Wh/m ²]
GRNN	general regression neural network
h	altitudine
\bar{h}_c	conduttanza convettiva unitaria [W/m ² K]
H	numero ore diurne
HRA	angolo orario
Hu	umidità
I – V	caratteristica corrente – tensione
I ₀	corrente di saturazione del diodo [A]
I	corrente [A]
InGaP/GaAs/Ge	Fosforo Indio Gallio/Arseniuro Gallio/Germanio
ISFOC	Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentracion
k	conducibilità [W/mk]
K	conduttanza globale [W/K]

k_b	trasmissione solare diretta
k_t	indice di chiarezza
LCA	Life cycle assessment
L_g	longitudine
LM	Levenberg – Marquardt
LST	local standard time
L_t	latitudine
m	fattore di idealità
\dot{m}	portata massica [kg/s]
max	massima
MAE	mean absolute error
MAPE	mean absolute percentage error
mdo	manodopera
MJ	multi junction
MLP	multi layer perceptron
MLR	multiple linear regression
MSE	mean squared error
MTBF	Mean time between failure
MTTR	Mean time to repair
N	numero celle
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OOBE	Out of bag error
P	potenza [W]
Pr	precipitazioni
ph	foto – generata
PV	photovoltaic
r	raggio [mm]
R	resistenza [Ω]
R^2	goodness of fit
RBF	radial basis function
Re	numero di Reynolds
RF	Random Forest
RMSE	radical mean squared error
RTD	termo – resistenza
SD	durata del soleggiamento
Si	Silicio
SMU	Source meter unit
SPB	Simple payback
T	temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
TJ	tripla giunzione
t_{nr}	tempo di non funzionamento [h]
tot	totale
V	tensione [V]
V_s	volume [m^3]

Lista dei simboli

v	velocità [m/s]
w	vettore dei pesi
WS	velocità del vento
x	solari

Simboli in greco

α	angolo di altezza solare
β	angolo inclinazione modulo
γ	angolo di azimut
δ	angolo di declinazione solare
ε	emissività
η	rendimento
θ	angolo di accettazione
θ_z	angolo di zenit
ρ	densità [kg/m ³]
σ	costante di Stefan – Boltzmann
τ	trasmissanza
Φ	angolo di troncatura

Pedici

a	ambiente
air	aria
c	cella
cal	caleidoscopio
conf	configurazione
dir	diretta
el	elettrico
f	fluido
fr	frigorifera
g	globale
geo	geometrico
id	ideale
in	ingresso
inc	incidente
int	intermedio
is	isolante
mod	modulo
oc	open circuit
opt	ottico
out	uscita
p	punta
pr	preriscaldamento

Lista dei simboli

rif	riferimento
s	serie
sc	short circuit
sh	shunt
sost	sostituzioni
t	tubo
ter	termico
th	teorico

Appendice

C. Renno, F. Petito. Design and modeling of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system for a domestic application. *Energy and Buildings*, 2013, 62:392 – 402.



Design and modeling of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system for a domestic application

Carlo Renno*, Fabio Petito

Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Via Ponte Don Melillo, 84084 Fisciano, Salerno, Italy

ARTICLE INFO

Article history:
Received 21 December 2012
Received in revised form 28 January 2013
Accepted 20 February 2013

Keywords:
Concentrating photovoltaic
CPV/T system design and model
Domestic application

ABSTRACT

In this paper a theoretical model of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system is presented in order to size it and to evaluate its thermal and electrical performance when it is used to satisfy the electric, heating and cooling loads referring to a domestic application. First of all choice and sizing of the CPV/T system components are considered. The reflective optics with parabolic mirror concentrators of point-focus type and the triple-junction cells (InGaP/InGaSb/Ge) assembled with a dual axis tracker are used to obtain a high concentration system. An active cooling system of the photovoltaic cells is considered. In order to satisfy the cooling load, the CPV/T system allows to recover thermal energy at high temperature for the absorption heat pump working. The model analyzes the CPV/T system working for different time levels (yearly, monthly, daily, hourly) in terms of direct normal irradiance, cell efficiency, module electric and thermal efficiency, thermal and electric energy provided by cell and module, cell and cooling fluid temperatures. The simulation process has allowed to define the best configuration of the CPV/T system under different working conditions and to evaluate the energy and economic convenience of the CPV/T system in comparison with a traditional system.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The photovoltaic systems allow to produce electric energy with competitive costs if compared to traditional systems; in the past years the concentrating photovoltaic systems (CPV) have been greatly developed [1,2]. In the CPV systems the solar radiation is concentrated by means of optical devices that allow to decrease the solar cells area proportionally to the concentration factor (C); C is the ratio between the primary concentrator area and that of the solar cell [3]. A concentration system consists of three parts: receiver, focusing optics and solar tracker. The receiver is the component that includes both the solar cell and the heat dissipation system. The focusing optics allows the sunlight concentration on the receiver. Since the concentration systems work with the sunlight direct component, the receiver and the focusing optics require the use of a single axis or dual axis solar tracker in order to optimize the incident radiation at any moment. About the optics there are two basic solutions. The first is the refractive by means of the Fresnel lenses [4]; sometimes in order to concentrate the best radiation on the cells, a secondary optics can be used with additional costs. The second solution considers the parabolic concentrators, consisting essentially of mirrors able to concentrate the radiation on the cells without reproducing the light source image; moreover,

a secondary optics with light guide could be coupled with this system to increase the concentration and enhance the radiation focus [5,6]. Another important aspect is related to the solar cells use; in the last years the triple junction cells are more adopted. They have a voltage-current characteristic which increases logarithmically with the concentration level [7]. They are also less influenced by the temperature increase, as the lower percentage decrease of the open circuit voltage shows; hence, efficiencies over 30% are experimentally achieved [4]. There are various types of concentration systems, which depend on the type of sunlight focus and receiver, and classified, according to the concentration factor, in plants at low, medium and high concentration. In many studies the advantages obtained with the concentration are evaluated in terms of electrical performance. In [6] a low concentration system with parabolic concentrators is discussed. In [8] the possibility to use arrays of cells with high performance such as GaAs instead of traditional cells is studied, concentrating the solar radiation with a linear reflector and adopting heat recovery systems in order to obtain both higher electric performance and thermal energy. The thermal energy can be recovered by the solar cells both by means of active systems using a cooling fluid and with passive cooling systems that use the natural convection mechanism [3]. An active mechanism of heat transfer is important either to cool the cells or to obtain exploitable thermal energy. In [9] a CPV/T system of small dimensions has been analyzed, based on a parabolic concentrator which reflects the radiation on a single cell. This system provides a particular mechanism of heat transfer which allows to extract heat

* Corresponding author. Tel.: +39 089 964327.
E-mail address: crenno@unisa.it (C. Renno).

C. Renno, F. Petito. Energy analysis of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system. *Energy Science and Technology*, 2013, 6:1 – 11.

 CSCanada
Energy Science and Technology
Vol. 6, No. 2, 2013, pp. 53-63
DOI:10.3968/jsst.1923847920130602.2618

ISSN 1923-8460(PRINT)
ISSN 1923-8479(ONLINE)
www.cscanada.net
www.cscanada.org

Energy Analysis of a Concentrating Photovoltaic Thermal (CPV/T) System

C. Renno^[a]; F. Petito^[b]

^[a]Associate professor. Ph.D. Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Fisciano (Salerno), Italy.
^[b]Ph.D. University of Salerno, Fisciano (Salerno), Italy.
*Corresponding author.

Received 30 July 2013; accepted 30 September 2013

Abstract

The potential of the concentrating photovoltaic technology has been evaluated from the thermal point of view in this paper. A model of a concentrating photovoltaic thermal system (CPV/T) was presented in order to size it and to evaluate its energy performance when it is used to satisfy the electric, heating and cooling loads referring to a domestic application. The choice and sizing of the CPV/T system components is first of all considered. The triple-junction cells and the reflective optics with parabolic mirror concentrators of point-focus type assembled with a dual axis tracker, are adopted in order to obtain a high concentration system; an active cooling system of the photovoltaic cells is also considered. The CPV/T system allows recovering thermal energy at high temperature for the absorption heat pump working. The model analyzed the CPV/T system working in terms of: cell efficiency, module electric and thermal efficiency, thermal and electric energy provided by the cell and module, cell and cooling fluid temperatures. So, the simulation process allows realizing an energy analysis and defining the best configuration of the CPV/T system, evaluating its energy convenience in comparison with a traditional system under different working conditions.

Key words: Concentrating photovoltaic; CPV/T system; Domestic application

C. Renno, F. Petito (2013). Energy Analysis of a Concentrating Photovoltaic Thermal (CPV/T) System. *Energy Science and Technology*, 6(2), 53-63. Available from: URL: <http://www.cscanada.net/index.php/est/article/view/10.3968/jsst.1923847920130602.2618>
DOI: <http://dx.doi.org/10.3968/jsst.1923847920130602.2618>

INTRODUCTION

The photovoltaic systems allow obtaining electric energy with competitive costs if compared to traditional systems; in the last years the concentrating photovoltaic systems (CPV) have been greatly developed (Kurtz, 2009; Mokri & Emziane, 2011). In the CPV systems the solar light is concentrated by means of optical devices that allow decreasing the solar cells area proportionally to the concentration factor (C); C is the ratio between the primary concentrator area and that of the solar cell (Zahedi, 2011). A concentration system consists of three parts: receiver, focusing optics and solar tracker. The receiver is the component that includes both the solar cell and the heat dissipation system. The focusing optics allows the sunlight concentration on the receiver. Since the concentration systems work with the sunlight direct component, the receiver and the focusing optics require the use of a single axis or dual axis solar tracker in order to optimize the incident radiation at any moment. About the optics there are two basic solutions. The first is the refractive by means of the Fresnel lenses (Zhai et al., 2010). The second solution considers the parabolic concentrators, consisting essentially of mirrors able to concentrate the radiation on the cells without reproducing the light source image; moreover, a secondary optics could be used to increase the concentration and enhance the radiation focus (Vossier et al., 2012; Brogren, 2004). As for the solar cells use in the last years the triple junction cells are more adopted. They have a voltage-current characteristic which increases logarithmically with the concentration level (Cotal et al., 2009). They are also less influenced by the temperature increase, as the lower percentage decrease of the open circuit voltage shows; hence, efficiencies over 30% are experimentally achieved (Zhai et al., 2010). There are various types of concentration systems, which depend on the type of sunlight focus and receiver, and classified, according to the concentration factor, in plants at low, medium and

Appendice

C. Renno, F. Petito. Choice model for a modular configuration of a point-focus CPV/T system. *Energy and Buildings*, 2015, 92:55 – 66.



Choice model for a modular configuration of a point-focus CPV/T system



Carlo Renno^a, Fabio Petito

Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano, Salerno, Italy

ARTICLE INFO

Article history:
Received 4 August 2014
Received in revised form
22 December 2014
Accepted 14 January 2015
Available online 29 January 2015

Keywords:
Concentrating photovoltaic
Heat recovery
Modular configuration
Point-focus

ABSTRACT

In this paper a model for choosing the proper modular configuration of a point-focus concentrating thermo-photovoltaic (CPV/T) system according to the domestic user energy demands, is presented. The main aim is to evaluate several modular configuration solutions in terms of energy and economic performances and space occupied. First of all, the main CPV/T system components are chosen: optics, solar cells and tracking system. A point-focus system with parabolic mirrors, triple-junction cells and dual-axis tracking system is considered. The choice of the proper CPV/T system configuration is realized considering an equations system that defines the electric and thermal performances in terms of solar radiation, cells number and concentration factor. The choice model presented in this paper allows to configure, referring to different Italian zones, the CPV/T system under several working conditions minimizing spaces and costs. It is observed that CPV/T modules with a lower cells number allow high flexibility to satisfy the loads. The high concentration level determines interesting solutions related to a domestic application from the energy and economic point of view, above all in southern Italy, during the CPV/T system life cycle. Finally, CPV/T systems allow a significant reduction of CO₂ emissions due to the primary energy savings.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The concentrating systems represent a photovoltaic market evolution [1] in comparison with the traditional systems which present low efficiency [2]. The main aspect to analyze is related to the unit production costs; from the industrial point of view [3] the limits related to the production costs of the materials used have been reached [4]. Even the use of triple-junction solar cells, which show the best efficiency in the solar energy conversion [5], does not allow a further decrease of production costs. On the contrary, the CPV/T systems allow to obtain simultaneously electric, thermal and cooling energy and then a decrease of costs.

The main characteristic of the concentrating photovoltaic (CPV) systems is to concentrate sunlight by means of optical devices decreasing the solar cells area proportionally with the concentration level [6]; higher temperatures are also reached [7]. This affects the electric performances but allows also a high thermal energy recovery. Moreover, the concentrating systems which adopt triple-junction cells are less affected by the temperature increase preserving a good electric efficiency [8].

There are many types of concentrating systems that differ because of the components used and the performances achieved; these devices can take advantage of the solar radiation concentration in order to obtain not only electric energy but also thermal energy. In [9] systems which recover thermal energy from GaAs cell arrays are considered. In [10] the fluid which cools the cells is accumulated in a tank. In [11] a particular type of concentrating dish is designed and connected to a system of tubes evacuated to obtain a more efficient heat production. In [12] the thermal energy of a concentrating system is used to supply a LiBr/H₂O single-effect absorption heat pump. In [13] the CPV/T system is linked to an organic Rankine cycle in order to increase the electricity production. In [14] is shown a CPV/T system coupled with an air conditioning plant in order to separate latent load from sensitive load. Finally, in [15] a new iCPV system is presented in order to obtain electrical power and water preheating. The different CPV/T system configurations and the purposes of each study analyzed are reported in Table 1. Hence, there are several ways of coupling of the CPV/T systems characterized by different optics or solar cells; this is the main reason that makes the industrialization process on large scale difficult, because there is not a standard configuration of the CPV/T systems. In this paper the main aim is to define a proper point-focus CPV/T system configuration that takes into account the domestic user load demands. In particular, a choice

^a Corresponding author. Tel.: +39 089 964327.
E-mail address: crenno@unisa.it (C. Renno).

C. Renno, F. Petito, A. Gatto. Artificial neural network models for predicting the solar radiation as input of a concentrating photovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 2015, 106:999 – 1012.



Artificial neural network models for predicting the solar radiation as input of a concentrating photovoltaic system



C. Renno*, F. Petito, A. Gatto

Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano, Salerno, Italy

ARTICLE INFO

Article history:
Received 23 June 2015
Accepted 11 October 2015

Keywords:
Artificial neural network
Direct normal irradiance
Global solar radiation
Concentrating photovoltaic
Thermal system

ABSTRACT

The energy production analysis of a system based on renewable technology depends on the inputs estimation accuracy. The solar energy is a free resource characterized by high variability; hence, its correct evaluation is a strategic factor for the feasibility of a solar system. In this paper a new methodological approach is presented in order to evaluate more accurately the electric and thermal energy production of a point-focus concentrating photovoltaic and thermal system (CPV/T). Two Artificial Neural Network (ANN) models for predicting solar global radiation and direct normal solar irradiance (DNI) are developed adopting different parameters such as climatic, astronomic and radiometric variables. In particular, a new combination of parameters is proposed in this paper and adopted first of all for the global radiation evaluation whose ANN model can be easily compared with the literature; the data are trained and tested by a multi layer perceptron (MLP). Hence, the results validation for the global solar radiation evaluation has encouraged to design an ANN model for the DNI by means of a similar variables set. The MLP network is trained, tested and validated for the hourly DNI estimation obtaining the MAPE, RMSE and R^2 statistical indexes values respectively equal to 5.72%, 3.15% and 0.992. Finally, the electric and thermal outputs of a point-focus CPV/T system are evaluated varying the concentration factor and cells number; and adopting as input the DNI evaluation results obtained by the ANN model presented in this paper. The CPV/T system outputs are estimated referring to the city of Salerno (Italy) under different meteorological conditions.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Renewable technologies play a relevant role in the energy production field. Their impact has become considerable in order to satisfy the energy demands of residential and industrial users [1]. Solar energy is widely recognized as the main renewable source; it constitutes a free resource largely available in the world [2]. The solar energy can be exploited by means of photovoltaic and solar systems in many applications as: demand balancing of electrical energy in national grids, reduction of environmental pollution, design and size of integrated energy systems. In particular, the concentrating photovoltaic and thermal systems (CPV/T) have been highly developed in the last years. Their main characteristic is to concentrate sunlight on a photovoltaic receiver by means of optical devices and then to decrease the solar cells area proportionally to the concentration factor (C) [3] equal to the ratio between the primary concentrator area and receiver area. High temperatures are also reached by means of the sunlight concentration [4]; so, it is necessary to cool the cells. The CPV/T systems usually

adopt triple-junction cells, whose electric efficiency is less affected by the temperature increase [5]. Hence, the CPV/T systems allow the simultaneous production of electrical and thermal energy. These devices are more complex in comparison with the traditional photovoltaic systems and a standard configuration does not exist. In literature many CPV/T systems are present [6] and are different for optical [7], photovoltaic and thermal characteristics [8]. However, since the optics has to focus the sunlight on the cells, these systems can work only with the solar radiation direct component. For this reason it is basic to achieve an accurate evaluation of global and direct radiation. Many models have been developed in literature in order to evaluate the solar radiation. There are empirical [9], numerical and statistical models [10], physical models, etc., but the solar radiation prediction based on most of these models can't be accurate because of the intrinsic complexity of the problem.

The Artificial Neural Network (ANN) models are a very useful solution for problems which depend on many physical phenomena [11]. They adopt the long-term data series obtaining a higher level of reliability. Kalogirou has reported the ANN use in renewable energy systems applications [12]. Moreover, many ANNs have been developed in order to evaluate the global solar radiation. Azadeh et al. [11] estimated monthly the global solar radiation for six cities

* Corresponding author.
E-mail address: crenno@unisa.it (C. Renno).

Appendice

C. Renno, S. Miranda, F. Petito. Inefficiencies analysis of a point-focus CPV/T system, *International Journal of Green Energy*, 2016, 13(9): 918 – 929.

INTERNATIONAL JOURNAL OF GREEN ENERGY
2016, VOL. 13, NO. 9, 918–929
<http://dx.doi.org/10.1080/15435075.2015.1112286>



Inefficiencies analysis of a point-focus CPVT system

C. Renno, S. Miranda and F. Petito

Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Fisciano (Salerno), Italy

ABSTRACT

In this paper, a point-focus concentrating photovoltaic and thermal (CPVT) system, sized for a domestic application, is presented in order to evaluate its inefficiencies and the related costs. The CPVT system adopts parabolic concentrator mirrors to reflect the light on triple-junction cells InGaP/InGaAs/Ge (Indium-gallium phosphide/Indium-gallium arsenide/germanium) placed on pipes, where the cooling fluid flows; CPVT system consists of three modules in parallel linked to a tank that works as hot water storage. The main maintenance problems are due to: moving parts such as the tracking system, cell wear linked to hotspot problems and optics cleaning. In particular, the model presented allows us to evaluate electric and thermal outputs, energy inefficiencies, and maintenance costs of the CPVT system. The analysis has been subdivided in several steps and a FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) approach has been considered to investigate the main failure modes and their relative effects in terms of efficiency losses and intervention costs. So, the inefficiencies analysis has allowed to identify the system malfunction causes, evaluating the impact due to the stops for each type of fault. Hence, an economic analysis has allowed to evaluate the CPVT system convenience when inefficiencies and maintenance incidence are also considered.

KEYWORDS

Cell temperature;
concentrating systems;
inefficiencies analysis;
maintenance; thermal
efficiency

Introduction

Several interesting photovoltaic applications that allow us to obtain a competitive energy production in comparison with traditional systems, are present in the market (Mokri and Emziane 2011). The concentrating photovoltaic systems (CPV) in the last years have been greatly developed; they are an evolution of the standard photovoltaic (PV) modules. The main characteristic of the CPV systems is to concentrate sunlight by means of optical devices and then to decrease the solar cells area proportionally with the concentration factor (C) (Zahedi 2011); C is the ratio between primary concentrator area and solar cell area.

A concentration system consists of three parts: receiver, focusing optics, and solar tracker. The receiver includes solar cell and heat dissipation system which can be active or passive. In the last years, triple junction solar cells are more adopted for their electric characteristics. The open-circuit voltage increases logarithmically with C and the temperature increase determines a lower percentage decrease of the open circuit voltage; hence, efficiencies over 30% are experimentally achieved (Cotal et al. 2009). The optics allows the sunlight focusing on the solar cell but, since the concentration systems work with the sunlight direct component, a solar tracking system is required in order to align the concentrator axis with the sun rays at any moment. There are two solutions for the focusing optics: refractive adopting Fresnel lenses or reflective that uses parabolic mirrors (Hang et al. 2013).

By means of the concentration systems higher temperatures are also reached (Ho, Mao, and Greif 2011); they affect

the electric performances but allow also a high thermal energy recovery with concentrating photovoltaic and thermal (CPVT) systems. A CPVT system has a higher initial cost compared to traditional systems, but it allows the simultaneous production of electric and thermal energy determining an operating costs decrease. Several papers (Li et al. 2011; Lin 2013) describe different concentrating systems from the energy and economic point of view, but the absence of a common standard configuration for the CPVT system makes difficult the industrialization process on large scale. Hence, in order to analyze the CPVT system feasibility, several aspects should be evaluated. In particular, it is basic to consider also the inefficiencies and maintenance problems in the CPVT system feasibility analysis. A concentrating system presents different components which can wear out and cause possible failures. These aspects should be analyzed in order to evaluate both the CPVT system real economic and energy advantages and the right maintenance policies to be adopted.

The aim of this paper is to analyze the inefficiencies and maintenance problems and the related costs related to a point-focus CPVT system sized for a domestic application. The main problems are linked to: moving components such as the tracking system, cell wear due to hotspot problems, that can affect the cell efficiency and reduce the energy output, and optics cleaning. These devices should be free of impurities in order to avoid a transmission efficiency decrease and a not perfect sunlight concentration (Brogen 2004). FMECA (Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis) approach has been adopted in order to analyze the main failure modes

CONTACT C. Renno crenno@unisa.it Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano (Salerno), Italy.
Color versions of one or more of the figures in this article can be found online at www.tandfonline.com/jge.
© 2016 Taylor & Francis Group, LLC

G. De Feo, M. Forni, F. Petito, C. Renno. Life cycle assessment and economic analysis of a low concentrating photovoltaic system. *Environmental Technology*, 2016, 37(19):2473 – 2482.

ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY, 2016
VOL. 37, NO. 19, 2473–2482
<http://dx.doi.org/10.1080/09593333.2016.1152308>



Life cycle assessment and economic analysis of a low concentrating photovoltaic system

G. De Feo, M. Forni, F. Petito and C. Renno

Department of Industrial Engineering University of Salerno, Fisciano, Italy

ABSTRACT

Many new photovoltaic (PV) applications, such as the concentrating PV (CPV) systems, are appearing on the market. The main characteristic of CPV systems is to concentrate sunlight on a receiver by means of optical devices and to decrease the solar cells area required. A low CPV (LCPV) system allows optimizing the PV effect with high increase of generated electric power as well as decrease of active surface area. In this paper, an economic analysis and a life cycle assessment (LCA) study of a particular LCPV scheme is presented and its environmental impacts are compared with those of a PV traditional system. The LCA study was performed with the software tool SimaPro 8.0.2, using the Ecoinvent 3.1 database. A functional unit of 1 kWh of electricity produced was chosen. Carbon Footprint, Ecological Footprint and ReCiPe 2008 were the methods used to assess the environmental impacts of the LCPV plant compared with a corresponding traditional system. All the methods demonstrated the environmental convenience of the LCPV system. The innovative system allowed saving 16.9% of CO₂ equivalent in comparison with the traditional PV plant. The environmental impacts saving was 17% in terms of Ecological Footprint, and, finally, 15.8% with the ReCiPe method.

ARTICLE HISTORY

Received 5 October 2015
Accepted 4 February 2016

KEYWORDS

Photovoltaic; LCPV; economic analysis; life cycle assessment; LCA

Downloaded by [Universita Degli Studi di Salerno] at 01:20 28 July 2016

Nomenclature

A	area (m ²)
BIPV	building-integrated photovoltaic
C	concentration factor
c	specific market cost (€/kWh)
CdTe	cadmium telluride
CF	cash flow (€)
CPV	concentrating photovoltaic
E	energy (kWh)
G	irradiance (W/m ²)
HCPV	high concentrating photovoltaic
I	global radiation (kWh/m ²)
LCA	life cycle assessment
LCPV	low concentrating photovoltaic
M	proportionality coefficient
N	number
P	power (kW)
PV	photovoltaic
Si	silicon
STC	standard conditions
t	time (years)
T	temperature (°C)
x	suns

Greek symbols

η	efficiency
α	temperature coefficient (% / °C)

Subscripts

a	active
BOS	balance of system
c	cell
CPV	concentrating photovoltaic
ee	electric energy
el	electric
g	global
inv	inverter
l	loss
LCPV	low concentrating photovoltaic
m	module
mir	mirror
opt	optic
pb	payback
pv	photovoltaic
std	standard
Sys	system
tot	total
wir	wiring

1. Introduction

In the last years, the use of photovoltaic (PV) systems rapidly increased, allowing a decrease of the unit cost of electricity production. From an industrial point of view, the limits related to the production costs of the materials have been reached.[1] However, new systems

CONTACT G. De Feo g.defeo@unisa.it Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano, Salerno, Italy
© 2016 Taylor & Francis

Appendice

C. Renno, F. Petito, A. Gatto. ANN model for predicting the direct normal irradiance and the global radiation for a solar application to a residential. *Journal of Cleaner production*, 2016, 135:1298 – 1316.

Journal of Cleaner Production 135 (2016) 1298–1316



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro



ANN model for predicting the direct normal irradiance and the global radiation for a solar application to a residential building



C. Renno*, F. Petito, A. Gatto

Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano, Salerno, Italy

ARTICLE INFO

Article history:
Received 14 March 2016
Received in revised form
22 June 2016
Accepted 9 July 2016
Available online 11 July 2016

Keywords:
Solar energy
Artificial neural network
Direct normal irradiance and global radiation
Photovoltaic systems

ABSTRACT

An accurate solar potential estimation of a specific location is basic for the solar systems evaluation. Generally, the global solar radiation is determined without considering its different contributes, but systems as those concentrating solar require an accurate direct normal irradiance (DNI) evaluation. Solar radiation variability and measurement stations non-availability for each location require accurate prediction models. In this paper two Artificial Neural Network (ANN) models are developed to predict daily global radiation (GR) and hourly direct normal irradiance (DNI). Two heterogeneous set of parameters as climatic, astronomical and radiometric variables are introduced and the data are obtained by databases and experimental measurements. For each ANN model a multi layer perceptron (MLP) is trained and validated investigating nine topological network configurations. The best ANN configurations for predicting GR and DNI are tested on different new dataset. MAPE, RMSE and R^2 for the GR model are respectively equal to 4.57%, 160.3 Wh/m² and 0.9918, while for the DNI they are equal to 5.57%, 17.7 W/m² and 0.994. Hence, the proposed models show a good correlation both between measured and predicted data and with the literature. The main results obtained are the DNI and the GR models predicting which have allowed the evaluation of the electric energy production by means of two different photovoltaic systems used for a residential building. Hence, the developed ANN models represent a good tool to support the assessment of the green energy production evaluation.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The solar radiation prediction is a basic aspect in the modeling and performance evaluation of the solar systems (Wald et al., 2015), when the energy demands of different kind of users have to be satisfied (Mesade and Islam, 2015). The solar energy can be used in many applications as: electrical energy demand balancing in the national grids, environmental pollution reduction, design and size of integrated energy systems, thermal load analysis in the buildings, atmospheric energy balance studies (Eicker et al., 2015). Sunlight is principally composed by the direct and diffuse components. The solar energy analysis takes usually into account the global solar radiation for a specific location without considering its different contributes. Although the most applications adopt the global radiation, the concentrating photovoltaic systems (CPV) require, generally, an accurate evaluation of the direct normal irradiance (DNI) also for a domestic application (Renno and Petito,

2015). The solar resource data availability can play a strategic role in the solar systems assessment (Qazi et al., 2015). Generally different measurement equipments are adopted in the solar energy evaluation such as pyranometer, solarimeter and pyrhemometer. The solar radiation variability and the measurement stations non-availability for each location require accurate prediction models which include different variables. This is fundamental when the direct normal irradiance has to be predicted. In particular, the use of an ANN which predicts the DNI could be also a key factor in order to assess the residential CPV/f systems potential (Sharaf and Orhan, 2015). Hence, for the assessment, control and optimization of the solar systems an integrated forecast is necessary, able to consider the different solar radiation components and a temporal level of the prevision from 1 h up to one day or one month in advance. So, an accurate evaluation of the solar energy potential for different locations is a basic factor in order to configure a solar system. In particular, it allows to support the evaluation of a cleaner production for different locations, taking into account different components of the solar source. The solar radiation prediction is complex because affected by several variables such as meteorological, climatic and radiometric. Several methods have been developed in

* Corresponding author.
E-mail address: crenno@unisa.it (C. Renno).

C. Renno, F. Petito. Experimental and theoretical model of a concentrating photovoltaic and thermal system. *Energy Conversion and Management*, 2016, 126:516 – 525.



Experimental and theoretical model of a concentrating photovoltaic and thermal system



C. Renno*, F. Petito

Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano (Salerno), Italy

ARTICLE INFO

Article history:
Received 5 April 2016
Received in revised form 7 August 2016
Accepted 15 August 2016

Keywords:
Concentrating photovoltaic and thermal system
Experimental analysis
ANSYS model
Heat recovery

ABSTRACT

The experimental and theoretical analysis of a concentrating photovoltaic and thermal system (CPV/T) presented in this paper allows to evaluate the electrical parameters of the system, the concentration factor, the cell temperature in different working conditions and the fluid temperature. In particular, the experimental values of the cell temperature represent the input of a model developed in ANSYS-CFX. This model evaluates the theoretical temperature values of the fluid that flows into the cooling circuit of the CPV/T system, designed with the CATIA software. Hence, both electrical and thermal parameters have been analyzed in order to evaluate the potential energy production of a concentrating photovoltaic and thermal system. Different configurations of the CPV/T system have been analyzed and the value of the concentration factor has been determined by means of an experimental procedure. The experimental and theoretical electric powers are compared in different climatic conditions considering a solar irradiance included between 500 and 900 W/m². The electric efficiency is also evaluated as function of solar irradiance and cloudiness. Moreover, the fluid temperature as function of the experimental cell temperature is determined in different working conditions by means of the ANSYS model. The fluid temperature is also theoretically determined varying the operating conditions along the circuit. Finally, a study of the electrical and thermal performances represents a key-factor to develop a more complex prototype of a CPV/T system.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

In a concentrating photovoltaic system (CPV) the sunlight is concentrated on triple-junction solar cells by means of an optical device and higher temperatures are also obtained [1]. This has an impact on the electric performances and, differently from the traditional photovoltaic systems, on the possible recovery of thermal energy at high temperature. Hence, the concentrating photovoltaic and thermal systems (CPV/T) allow to obtain electric and thermal energy [2]. Therefore, the heat removal becomes a strategic factor that affects the CPV/T system configuration [3]. Many applications are investigated in literature in order to evaluate the potential of the CPV/T systems. In [4] a review of various cooling technologies available for CPV systems is presented. The technology should be reliable and maintain a low and uniform cell temperature. In [5] the fluid which cools the cells is accumulated in a tank. In [6] a concentrating dish is linked to a system of tubes evacuated to have an efficient thermal energy production. In [7] the performances of a CPV/T system with a Fresnel concentrator are studied. In [8] a

new multi-layer manifold micro-channel cooling system for concentrating photovoltaic cells is presented. In [9] a CPV/T system is designed in order to recover thermal energy and to increase the electric production. In [10] a compound parabolic concentrator is modified to evaluate the performances of a new solar concentrator working simultaneously as electricity generator and thermal collector. In [11] related to the electric, heating and cooling loads of a domestic user, the design and model of a CPV/T system are studied. In [12] the optimized value of the concentration factor able to provide a fluid outlet temperature that satisfies the thermal and cooling demands and to decrease the CPV/T system size, is obtained in each working condition. Hence, there are several CPV/T systems that allow a combined energy production, but it is not possible to obtain a standard configuration [13]. Therefore, it is important to evaluate accurately for each operating condition both the electrical and thermal performances of a CPV/T system. In particular, it is necessary to evaluate the cell temperature that depends on the concentration of the solar radiation, and influences the electrical performances of the same cell. This is basic to evaluate the temperatures reached by the working fluid in a CPV/T system. These evaluations can be carried out both experimentally and theoretically. In [14] a numerical and experimental study of a

* Corresponding author.
E-mail address: crenno@unisa.it (C. Renno).

Appendice

C. Renno, F. Petito, G. Landi, H.C. Neitzert. Experimental characterization of a concentrating photovoltaic system varying the light concentration. *Energy Conversion and Management*, 2017, 138:119 – 130.

Energy Conversion and Management 138 (2017) 119–130



Contents lists available at ScienceDirect
Energy Conversion and Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enconman



Experimental characterization of a concentrating photovoltaic system varying the light concentration



C. Renno*, F. Petito, G. Landi, H.C. Neitzert

Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084 Fisciano, Salerno, Italy

ARTICLE INFO

Article history:
Received 18 October 2016
Received in revised form 24 December 2016
Accepted 19 January 2017

Keywords:
Triple-junction cell
Experimental characterization
Concentrating photovoltaic system
Cell temperature

ABSTRACT

The concentrating photovoltaic system represents one of the most promising solar technologies because it allows a more efficient energy conversion. When a CPV system is designed, the main parameter which has to be considered is the concentration factor that affects both the system energy performances and its configuration. An experimental characterization of a CPV system previously realized at the University of Salerno, is presented in this paper considering several aspects related to the optical configuration, the concentration factor and the solar cell used. In particular, the parameters of an Indium Gallium Phosphide/Gallium Arsenide/Germanium triple-junction solar cell are investigated as function of the concentration factor determined by means of an experimental procedure that uses different optical configurations. The maximum concentration factor reached by the CPV system is 310 suns. The cell parameters dependence on the concentration is reported together with an electroluminescence analysis of the Indium Gallium Phosphide/Gallium Arsenide/Germanium cell. A monitoring of the electrical power provided by the system during its working is also presented corresponding to different direct irradiance values. A mean power of 2.95 W with an average efficiency of 32.8% is obtained referring to a mean irradiance of 930 W/m²; lower values are obtained when the irradiance is highly fluctuating. The concentrating photovoltaic system electric energy output is estimated considering different concentration levels; the maximal obtained value is 23.5 Wh on a sunny day at 310×. Finally, the temperature of the triple-junction solar cell is evaluated for different months in order to evaluate the potential annual thermal energy production of the concentrating photovoltaic system.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The concentrating photovoltaic system (CPV) constitutes an interesting solution in the field of the solar energy technologies [1]. In order to satisfy the energy demands of residential and industrial users, they represent an evolution of the traditional photovoltaic (PV) plants [2]. In particular, the CPV system is considered one of the most promising solar technologies allowing a more efficient energy conversion [3] and, then, a high decrease of the environmental pollution [4]. Moreover, they present an economically interesting solution with respect to the levelized cost of energy (LCOE), in particular under conditions where a high percentage of direct solar radiation is present [5]. Other technologies such as the flexible solar panels are also interesting [6], but they do not expect the solar concentration. Hence, the main characteristic of the CPV systems is to concentrate sunlight by means of

optical devices decreasing the necessary solar cell area proportionally to the concentration factor (C) [7]. This parameter indicates how many times the solar radiation, incident on the primary optics, is concentrated on the solar cell [8]. Hence, it represents a key variable in the CPV system design, which affects both the system electric energy performances and its configuration. CPV systems employ multi-junction (MJ) solar cells, which present the highest electric efficiency among the solar cells [9]. On the one side the use of the MJ solar cell allows lower values of the charge-carrier thermalization losses and, then, stable operating temperatures but, on the other side, the increase of the sunlight concentration factor leads to an increase of the cell temperature. Overall a good electric power conversion efficiency can be achieved [10]. An active cooling of the cells would allow to increase the power conversion system efficiency further [11]. This constitutes a strategic factor of the concentrating photovoltaic and thermal systems (CPV/T). Such combined systems allow to produce simultaneously electric and thermal energy, exploiting the heat recovery from the solar cells [12]. So, referring to the thermal energy production, these systems allow a further reduction of the unitary costs [13]. The study

* Corresponding author.
E-mail address: crocco@unisa.it (C. Renno).