



UNIONE EUROPEA



*Ministero dell'Istruzione
dell'Università e Ricerca*



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
INDUSTRIALE*

*Dottorato di Ricerca in Ingegneria
Meccanica*

X Ciclo N.S. (2008-2011)

*“Sperimentazione e controllo di un veicolo
ibrido-solare con tetto orientabile”*

Ing. Gaetano Coraggio

Il Tutor

Ch.mo Prof. Gianfranco Rizzo

Il Coordinatore

Ch.mo Prof. Vincenzo Sergi

a Cecilia ...

SOMMARIO

SOMMARIO	I
INDICE DELLE FIGURE	IV
INTRODUZIONE	1
I PARTE.....	5
1. VEICOLI IBRIDI SOLARI.....	7
1.1. STORIA DELL' AUTOVEICOLO	7
1.2. VEICOLI ELETTRICI.....	12
1.3. VEICOLI IBRIDI.....	13
1.4. VEICOLI IBRIDI SOLARI	15
1.5. PROTOTIPO UNISA	17
2. L'ENERGIA SOLARE	19
2.1. L'ENERGIA	19
2.2. FONTI DI ENERGIA RINNOVABILE.....	19
2.3. L'ENERGIA SOLARE.....	20
2.3.1. LA RADIAZIONE SOLARE.....	21
2.3.2. L'ENERGIA UTILE	22
2.4. LE TECNOLOGIE.....	23
2.4.1. IL SOLE PER LE AUTO	24
2.5. IL FOTOVOLTAICO	24
2.5.1. CHE COS'È IL FOTOVOLTAICO?	24
2.5.2. IMPIANTO FOTOVOLTAICO	25
2.6. I PANNELLI FOTOVOLTAICI	26
2.7. ENERGIA SOLARE PER LE AUTO	28
2.8. LE BATTERIE.....	31
2.9. I BENEFICI AMBIENTALI	31
3. LABVIEW®	33
3.1. COS'È LABVIEW?.....	33
3.2. STRUMENTI VIRTUALI.....	34
3.2.1. FRONT PANEL	35
3.2.2. BLOCK DIAGRAM.....	35
3.3. AMBIENTE LABVIEW.....	36
3.4. SISTEMA NI COMPACTRIO	38
3.5. MODULI I/O	38
3.5.1. NI 9205.....	39
3.5.2. NI 9401.....	39
3.5.3. NI 9263.....	39
3.6. LABVIEW FPGA	39

3.7. PROCESSORE REAL-TIME	40
4. GESTIONE ENERGETICA DI UN HSV	41
4.1. CONTROLLO DEGLI HSV	41
4.2. APPLICATIVO LABVIEW	42
4.3. STRATEGIA RULE-BASED	44
4.3.1. DETERMINAZIONE DEL SOC FINALE	45
4.3.2. STIMA DELLA POTENZA MEDIA RICHIESTA	45
4.4. RULE-BASED SU HSV	47
4.4.1. RISULTATI	48
II PARTE	51
5. ORIENTAMENTO DEI PANNELLI	53
5.1. GENERALITÀ	53
5.2. ENERGIA INCIDENTE	54
5.3. INCLINAZIONE DEI PANNELLI	58
5.4. ORIENTAMENTO PANNELLI	60
5.5. RENDIMENTO	61
5.6. POSIZIONE DEL SOLE	62
5.7. SIMULATORE PVWATTS	68
5.8. RISULTATI SPERIMENTALI - PVWATTS	70
5.8.1. EFFETTI DELLA ORIENTAZIONE DEI PANNELLI	71
6. IL ROBOT INDUSTRIALE	73
6.1. IL ROBOT INDUSTRIALE	73
6.1.1. ROBOT SERIALI	73
6.1.2. ROBOT PARALLELI	74
6.1.3. ROBOT IBRIDI SERIALI-PARALLELI	74
6.2. STRUTTURA DI UN SISTEMA ROBOTICO	74
6.3. I ROBOT A CINEMATICA PARALLELA	75
6.3.1. GIUNTI ATTUATI E NON ATTUATI	76
6.3.2. CLASSIFICAZIONE	76
6.3.3. GRADI DI LIBERTÀ	78
6.3.4. VOLUME DI LAVORO	78
7. PROGETTAZIONE DI UN TETTO SOLARE MOBILE	79
7.1. PERCHÉ ORIENTARE	79
7.2. QUANDO ORIENTARE	79
7.3. COME ORIENTARE	82
7.3.1. PROGETTAZIONE 3D	82
7.3.2. GRADI DI LIBERTÀ	83
7.3.3. VALIDAZIONE MODELLO MATEMATICO	84
8. REALIZZAZIONE DI UN TETTO SOLARE MOBILE	95
8.1. I PROTOTIPO	95

8.2. II PROTOTIPO	96
8.3. III PROTOTIPO	97
8.3.1. FUNZIONAMENTO	98
8.4. GLI HARDWARE	99
8.4.1. MICROCAMERA USB	100
8.4.2. SCHEDA NI USB-6009	100
8.4.3. SCHEDA DI GESTIONE DEI MOTORI	101
8.4.4. MOTORI STEP	102
8.5. I SOFTWARE	103
8.5.1. MATLAB	103
8.5.2. LABVIEW	106
8.5.3. ANALISI DI UNA SIMULAZIONE	107
9. CONTROLLO DEL TETTO SOLARE MOBILE.....	111
9.1. STRATEGIA DI CONTROLLO	111
9.1.1. CASO STUDIO	114
9.2. STRATEGIA DI INSEGUIMENTO	115
10. CONCLUSIONI.....	119
BIBLIOGRAFIA.....	123
RINGRAZIAMENTI.....	127

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 - Carro di Cugnot	7
Figura 1.2 - Panhard-Levassor	8
Figura 1.3 - Ford T	9
Figura 1.4 - Jamais Contente	10
Figura 1.5 - Semper Vivus	11
Figura 1.6 - Quiet Achiever.....	11
Figura 1.7 - Ibrido Serie	13
Figura 1.8 - Ibrido Parallelo	14
Figura 1.9 - Viking 23	16
Figura 1.10 - Ultra-Commuter	16
Figura 1.11 - Astrolab Venturi	16
Figura 1.12 - Solar Prius	16
Figura 1.13 - Prototipo di HSV dell'Università di Salerno.....	17
Figura 1.14 - Schema prototipo ibrido serie.....	18
Figura 2.1 - Distribuzione della radiazione solare sulla Terra	20
Figura 2.2 - Radiazione Solare	21
Figura 2.3 - Radiazione Solare Annuia	23
Figura 2.4 - Energia mensile da un impianto connesso a rete.....	25
Figura 2.5 - Trend dei rendimenti di conversione delle celle PV	27
Figura 2.6 - Solar Road	28
Figura 2.7 - Potenza necessaria alla trazione e potenza media nel tratto urbano (linea rossa). Ciclo medio europeo ECE-EUDC	29
Figura 2.8 - Andamento giornaliero qualitativo della potenza ottenibile da un pannello solare.....	30
Figura 3.1 - Struttura a tre layer	33
Figura 3.2 - Front Panel e Block Diagram	35
Figura 3.3 - Editor delle icone dei SubVI	37
Figura 3.4 - Riquadro dei connettori	37
Figura 3.5 - CompactRIO	38
Figura 3.6 - Modulo NI 9205	39
Figura 3.7 - Modulo NI 9401	39
Figura 3.8 - Modulo NI 9263	39
Figura 4.1 - Strategia Charge Sustaining	42
Figura 4.2 - Rule Based strategy	44
Figura 4.3 - Stima della potenza.....	46

Figura 4.4 - Diagramma di flusso per l'implementazione della RB sul CompactRIO.....	47
Figura 4.5 - Plot delle principali variabili acquisite durante il test on-board della strategia RB	48
Figura 5.1 - Pannello inclinato a 45°	53
Figura 5.2 - Angolo d'incidenza	54
Figura 5.3 - Angolo d'inclinazione del pannello	55
Figura 5.4 - Angoli per l'inclinazione del pannello	56
Figura 5.5 - AM: Air Mass number	58
Figura 5.6 - Pannello orizzontale, verticale, orientabile	58
Figura 5.7 - Orientamento di un pannello	60
Figura 5.8 - Energia media annua per differenti angolazioni della superficie	61
Figura 5.9 - Latitudine di un punto L.....	63
Figura 5.10 - Longitudine di un punto φ	63
Figura 5.11 - Declinazione solare δ	64
Figura 5.12 - Sfera celeste.....	65
Figura 5.13 - Equazione del tempo	66
Figura 5.14 - Altezza solare α	67
Figura 5.15 - Azimut solare γ	68
Figura 5.16 - Input ed Output del Simulatore PVWATTS	69
Figura 5.17 - U.S.A.	70
Figura 6.1 - Esempi di PKM [36]	75
Figura 7.1 - Condizioni di lavoro uniformi e in presenza di mismatching	80
Figura 7.2 - Potenza Richiesta ed Energia Solare fornita	82
Figura 7.3 - Prototipo di tetto solare mobile	83
Figura 7.4 - Schema del tetto mobile	85
Figura 7.5 - Posizione del tetto mobile	86
Figura 7.6 - Rappresentazione in Matlab del tetto mobile.....	87
Figura 7.7 - Interfaccia SimMechanics	88
Figura 7.8 - Animazione del tetto mobile in SimMechanics	88
Figura 7.9 - Tetto Solare Mobile in SimMechanics.....	90
Figura 7.10 - Grafico dei lavori meccanici tetto solare mobile.....	91
Figura 8.1 - I Prototipo di tetto solare mobile.....	95
Figura 8.2 - II Prototipo di tetto solare mobile.....	96
Figura 8.3 - III Prototipo in SolidWorks.....	97

Figura 8.4 - III Prototipo di tetto solare mobile	98
Figura 8.5 - Gradi di libertà del modello.....	99
Figura 8.6 - Micro USB 2.0 Color Camera System	100
Figura 8.7 - Scheda NI USB-6009	100
Figura 8.8 - Driver motore step TB6560.....	101
Figura 8.9 - Alimentatore Delta Electronics©	102
Figura 8.10 - Motori Vexta	102
Figura 8.11 - Diagramma di flusso dei software utilizzati.....	103
Figura 8.12 - Identificazione del punto di massima illuminazione.....	104
\ Figura 8.13 - Configurazione iniziale	105
Figura 8.14 - Configurazione orientata	105
Figura 8.15 - Block Diagram dell'automazione del prototipo	107
Figura 8.16 - Sequenza di fotogrammi.....	108
Figura 8.17 - Allineamento sul semiasse negativo delle ascisse.....	109
Figura 8.18 - Allineamento con l'asse delle ordinate.....	109
Figura 8.19 - Seconda rotazione azimutale	110
Figura 8.20 - Allineamento completato.....	110
Figura 9.1 - Strategia di controllo	111
Figura 9.2 - Azimut del sole e azimut del veicolo.....	112
Figura 9.3 - Tempo di recupero a Salerno.....	114
Figura 9.4 - Radiazione solare a Salerno su due superfici captanti.....	116
Figura 9.5 - Perdite di potenza rispetto ad un inseguitore solare ($\Delta t=1$ ora)	117
Figura 9.6 - Δt_{min} durante una giornata a Salerno	117
Figura 9.7 - Δt_{min} a differenti stagioni e per differenti condizioni del cielo	118

INTRODUZIONE

Da alcuni anni la questione energetico - ambientale è ormai diventata di dominio pubblico, perdendone magari dal punto di vista scientifico, ma diventando in grado di condizionare i comportamenti di una parte sempre crescente della popolazione.

La consapevolezza è che si debba correggere la rotta ed in fretta.

Obiettivo principale del presente lavoro di tesi è la ricerca incentrata su veicoli alternativi ai veicoli tradizionali il cui impatto sull'ambiente, in termini energetico - ambientali, è sempre crescente. Uno dei fattori più critici è legato all'incremento di CO₂ nell'atmosfera ed al depauperamento delle risorse fossili soprattutto dovuto all'incremento di mobilità in paesi come Cina ed India. D'altra parte, grazie anche alle sollecitazioni del protocollo di Kyoto, è aumentata l'attenzione verso le energie rinnovabili, soprattutto verso il fotovoltaico.

Si potrebbe pensare quindi ad auto ad energia solare. Questi tipi di vetture nonostante alcuni prototipi siano già stati realizzati non rappresentano però un'alternativa alle attuali vetture per una serie di motivi. Tra questi sicuramente la limitata potenza, la discontinuità della fonte energetica e per la loro forma che non ricorda affatto una vettura convenzionale come si è abituati a pensare.

Una valida alternativa sicuramente è quella dei veicoli ibridi, veicoli equipaggiati da un doppio propulsore. Un tipo d'ibrido che si sta sviluppando è l'ibrido elettrico. Il veicolo ibrido elettrico ha un propulsore elettrico ed uno termico.

L'inquinamento, però, derivante dalla produzione dell'energia elettrica necessaria al moto dei veicoli siano essi ibridi che elettrici resta se questa energia proviene da centrali elettriche. Questo, infatti, non risolve il problema dell'inquinamento, ma semplicemente lo sposta altrove. Se quest'energia, invece, fosse prodotta da fonti rinnovabili (solare, eolico, idroelettrico, energia dal mare) o dalle biomasse non contribuirebbe alla produzione di CO₂.

L'integrazione della fonte solare fotovoltaica, come soluzione in grado di contribuire ulteriormente a ridurre consumi ed emissioni, è una soluzione che non ne esclude altre ma può sommare i propri benefici a quelli ottenibili, per esempio, con i veicoli ibridi elettrici.

Si parla in questo caso di veicoli ibridi solari. Molti progetti di veicoli ibridi solari sono già stati portati avanti. Tra questi anche il prototipo sviluppato presso l'Università degli Studi di Salerno.

Naturalmente per questi veicoli il sole è una fonte di energia fondamentale. È chiaro che un aumento dell'energia captata dai pannelli solari incida positivamente su consumi ed emissioni. Un modo per aumentare quest'energia captata è quello di ricorrere ad un tetto solare auto orientabile, che sia in grado, cioè, di seguire i movimenti del sole durante l'arco della giornata.

Proprio su questi due punti si è concentrata l'attività di ricerca. Lo studio del prototipo di veicolo ibrido solare e la possibilità di quest'ultimo di equipaggiarsi di un tetto solare mobile in grado di disporsi perpendicolarmente ai raggi solari in fase di parcheggio per aumentare l'energia captata.

Il presente lavoro di tesi è, dunque, strutturato in due parti.

La prima parte è dedicata ai veicoli ibridi solari, al loro studio ed in particolare alla ricerca sulla loro gestione energetica ottimale. La seconda parte riguarda lo studio, la progettazione e la realizzazione di un tetto solare mobile per un veicolo ibrido solare.

In ognuna delle due parti ci sono dei capitoli introduttivi, utili a fornire al lettore il know-how necessario a comprendere meglio i temi oggetto della ricerca, e dei capitoli, invece, concentrati sull'attività di ricerca svolta.

Nel primo capitolo si partirà da una breve storia dell'autoveicolo dalla nascita fino ai giorni nostri. Successivamente si discuterà sulle alternative ai veicoli tradizionali con uno sguardo più da vicino ai veicoli ibridi elettrici (HEV) e ai veicoli ibridi solari (HSV). In particolare si farà riferimento al prototipo di veicolo ibrido solare dell'Università degli Studi di Salerno.

Visto che, come detto, nel primo capitolo si parlerà dei veicoli ibridi solari, il secondo capitolo riguarderà proprio la fonte di energia solare. Dopo una breve panoramica sulle energie rinnovabili si parlerà dell'energia solare (gratuita ed inesauribile) e del suo sfruttamento attraverso la tecnologia fotovoltaica. Proprio quest'ultima sarà in grado di fornire l'energia necessaria al veicolo tramite la conversione dell'energia solare in energia elettrica (processo fotovoltaico).

Il terzo capitolo sarà dedicato all'approfondimento del sistema di calcolo utile per lo studio della gestione energetica del veicolo ibrido solare: LabVIEW. Come si vedrà sul prototipo HSV saranno presenti una moltitudine di sensori e relè distribuiti sui vari componenti da osservare e/o pilotare. I segnali attraverseranno prima un sistema di condizionamento (HCS), per poi confluire ai moduli del CompactRIO di National Instruments, ed infine mediante una connessione remota saranno trasmessi al PC pronti ad essere elaborati per permettere interventi migliorativi sia a bordo veicolo che in modalità remota. Si parlerà della centralina di controllo CompactRIO programmata proprio attraverso il software LabVIEW.

Nel quarto capitolo si passerà ad esaminare la prima fase di ricerca quella che riguarda l'implementazione di strategie di controllo in ambiente NI CompactRIO per la gestione energetica ottimale di un veicolo ibrido solare (Hybrid Solar Vehicle - HSV) con configurazione serie. Ci sarà quindi una panoramica sulle strategie di controllo e gestione energetica con la presentazione di risultati sperimentali ottenuti sul prototipo di veicolo ibrido in esame.

Dal quinto capitolo inizia la seconda parte del lavoro incentrata, come detto, sullo studio di un tetto solare mobile per un veicolo ibrido solare. In questo capitolo si farà riferimento all'energia solare incidente sul pannello e come quest'ultimo si dovrà orientare per disporsi perpendicolarmente ai raggi solari. In particolare si farà riferimento agli angoli caratteristici del sole (altezza solare e azimut) che ne individuano la posizione nel cielo. Verranno poi presentati i calcoli effettuati con l'ausilio di un software on-line: PV WATTS. Questi calcoli sono atti a verificare la convenienza o meno nell'adozione di un tetto solare mobile.

Nel sesto capitolo si farà una panoramica sui robot industriali. Dopo una breve introduzione si parlerà dei robot paralleli. Questo perché il dispositivo di movimentazione del tetto solare ha la struttura di un robot parallelo. Si analizzeranno quindi le caratteristiche di massa di questi robot con particolare attenzione al calcolo dei gradi di libertà (dof) che ne influenzano il tipo di movimentazione.

Il settimo capitolo è dedicato alla progettazione del tetto solare. Attraverso tre domande: come, quando e perché, si cercherà di capire qual è la migliore soluzione in termini progettuali. In particolare si passerà da una progettazione meccanica (attraverso un software CAD 3D:

SolidWorks) ad una matematica (attraverso un software matematico: MATLAB).

Una volta validati i modelli solidi e matematici si passerà alla realizzazione, descritta nell'ottavo capitolo, di vari prototipi di tetto solare mobile. In questo capitolo si parlerà anche del funzionamento del prototipo attraverso una descrizione dei software e degli hardware ad esso connessi.

Infine nel nono, ed ultimo capitolo, verrà discussa una strategia di controllo del tetto (presentata anche in alcuni articoli scientifici) e dei risultati di quest'ultima applicati ad un caso studio.

I PARTE

**GESTIONE ENERGETICA DI UN
PROTOTIPO DI VEICOLO
IBRIDO SOLARE**

1. VEICOLI IBRIDI SOLARI

1.1. STORIA DELL'AUTOVEICOLO

La data dell'invenzione dell'auto non può essere stabilita con assoluta ed obiettiva esattezza. L'idea di un veicolo semovente per mezzo di un motore fu immaginata già da Leonardo da Vinci (1452-1591).

Tuttavia il primo mezzo di trasporto fu progettato nel 1769 da Joseph Cugnot (1725-1804) un ingegnere e militare francese. Questo veicolo (Figura 1.1) era azionato da un motore a vapore a due cilindri verticali con una cilindrata di circa 62.000 cm³ ed era grado di portare un carico di oltre 4 tonnellate. Il veicolo procedette lentamente solo per una dozzina di minuti raggiungendo una punta di velocità stimata inferiore ai 10 km/h. Questa pur brevissima esibizione segnò l'inizio della storia della motorizzazione: si tratta infatti della prima dimostrazione pratica fornita al mondo da un veicolo "auto-mobile" nel senso letterale del termine, vale a dire che si muove da sé tramite una forza non animale, non immagazzinata per mezzo di molle e che non utilizzava gli effetti del vento.



Figura 1.1 - Carro di Cugnot

Nonostante ciò la storia dell'automobile come mezzo di trasporto affermato e funzionante inizia nel XIX secolo. Molti ingegneri ed inventori continuavano a lavorare su modelli a trazione muscolare oppure a vela. Ciononostante la concorrenza di sistemi progrediti non si fece più attendere. L'attenzione si concentrò sullo sviluppo di diversi tipi di

propulsori. Nel 1854 Barsanti e Matteucci progettarono il primo motore a scoppio alimentato a gas. Lo stesso fece nel 1863 Lenoir applicando un motore, simile al precedente ma alimentato a petrolio, ad un veicolo a tre ruote con il quale percorse alcuni km. La svolta decisiva avvenne con il primo motore a quattro tempi studiato da Beau de Rochas e realizzato da Otto nel 1876. Fu il primo motore in cui la combustione avveniva all'interno della macchina (motore a combustione interna) anziché in un forno separato (motore a combustione esterna). Nel 1893 il professore Bernardi decise di sostituire il petrolio con la benzina e nel 1889 portò a termine la costruzione di un motore a benzina a quattro tempi, che chiamò Lauro. Nel 1892 l'ingegnere tedesco Diesel inventò un motore alimentato a gasolio e che ancora oggi porta il suo nome. Nel 1885 l'industriale tedesco Karl Benz realizzò molte delle parti fondamentali delle moderne autovetture (tra le altre cose il raffreddamento, la trasmissione e il differenziale). Nel 1888 anche Daimler costruì una propria automobile. La prima vera automobile però può essere considerata la Panhard-Levassor simile ad una carrozza ma con il motore montato sotto il cofano e raffreddato da un radiatore (Figura 1.2). Le innovazioni si succedettero senza sosta per tutta la durata del secolo. Alla fine del secolo furono impiantate le prime officine in America ed in Europa.



Figura 1.2 - Panhard-Levassor

Dato l'elevato costo, il mercato dell'automobile entrò in crisi già agli inizi del XX secolo. Fu Henry Ford a risolvere la crisi. Valendosi di qualificati tecnici lanciò la Ford T (Figura 1.3) che può essere considerata

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

la prima utilitaria. La Prima Model T di produzione uscì dallo stabilimento di Piquette (Detroit) il 27 settembre 1908 ed è stata la prima vettura prodotta in grande serie utilizzando la tecnica della catena di montaggio. Il concetto di catena di montaggio nasce già dai primi anni dell'800, nei cantieri della marina militare britannica e nel 1906 divenne una procedura standard utilizzata nell'industria manifatturiera civile. Questo evento si deve, appunto, all'americano Henry Ford, proprietario dell'omonima fabbrica automobilistica, che perfezionò il metodo della catena di montaggio ed introdusse il principio della divisione dei ruoli degli operai, estendendo l'uso del nastro trasportatore. Grazie ad un team di ingegneri, Ford sviluppò intere fabbriche basate sul concetto della catena di montaggio, ed i benefici che le sue industrie trassero, in termini di abbattimento dei tempi di produzione e di risparmio economico furono tali da spingere la maggior parte delle compagnie industriali dell'epoca ad assumere questo metodo, creando in definitiva un nuovo modo di intendere la produzione seriale che prese appunto il nome di fordismo.



Figura 1.3 - Ford T

Anche essendo meno elegante delle concorrenti, era tuttavia più affidabile, semplice, robusta ma soprattutto più economica. Si faceva, quindi, il primo passo verso la produzione di massa di autovetture che potessero essere alla portata dei ceti meno abbienti. Dopo la guerra, lo sviluppo industriale consentì innovazioni sempre diverse e più raffinate. Il bisogno di un sistema alternativo alla benzina si fece notare durante la

crisi del petrolio, nel 1973. Il sistema Diesel continuò quindi ad affermarsi accanto a quello a benzina, mentre in tempi successivi anche l'automobile elettrica tornò ad essere sviluppata.

Infatti non molti sanno che l'auto elettrica è stata una delle prime automobili ad essere sviluppata.

Pochi anni prima del 1900, prima della preponderanza del potente, ma inquinante, motore a combustione interna, le auto elettriche detenevano molti record di velocità e di distanze percorse con una carica. Tra i più notevoli di questi record è stato l'infrangere la barriera dei 100 km/h di velocità raggiunta dalla *Jamais Contente*, un veicolo elettrico a forma di razzo (Figura 1.4).

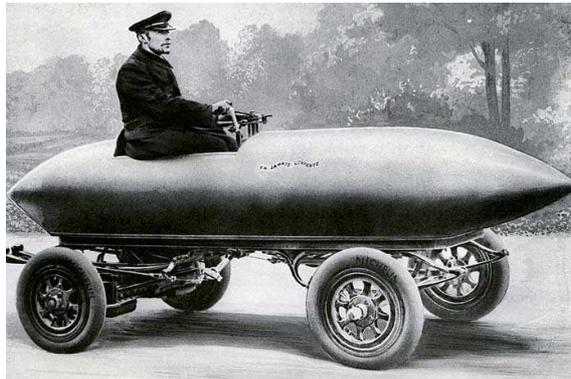


Figura 1.4 - Jamais Contente

Agli inizi del XX secolo si svilupparono tuttavia anche prototipi di veicoli ibridi sotto la spinta del celebre Ferdinand Porsche. L'invenzione che presentò nell'anno 1900 era visionaria: abbinò motori a batteria nei mozzi delle ruote con un motore a benzina. Così nacque il principio del motore ibrido seriale. Con la prima automobile "full hybrid" perfettamente funzionante del mondo, la "Semper Vivus" (sempre viva Figura 1.5) Ferdinand Porsche si mosse in un campo nuovo della tecnologia.

Verso la fine del XX secolo ci sono stati anche i primi studi su auto solari. L'auto solare è un sogno per tutti, in particolare per ecologisti e ambientalisti che sperano di far funzionare un'auto con un'energia rinnovabile e con basso o nullo impatto ambientale. Attualmente tutti i

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

prototipi di auto solare riguardano auto da competizione e la ricerca sta cercando di realizzarne anche per un uso su una scala più ampia.

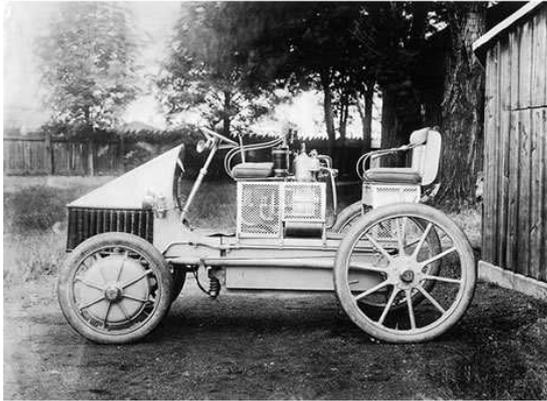


Figura 1.5 - Semper Vivus

I primi prototipi di auto solari sono nati negli anni '80, ed essi erano monoposto, molto leggeri ma per nulla pratici. Il primo a guidare un veicolo ibrido solare fu Hans Thstrup che realizzò la Quiet Achiever (Figura 1.6) guidò questo veicolo per 20 giorni, percorrendo 4052 km, da Sydney a Perth, nel 1983.



Figura 1.6 - Quiet Achiever

Nel 1987 si fece la prima sfida solare del mondo che dal quel momento in poi è diventato il riferimento principale dell'esperienza sui

veicoli solari, cioè su veicoli che sfruttano il sole per compiere lunghi tragitti.

Tutti i prototipi sinora realizzati hanno una forma aerodinamica, un involucro esterno in plastica, per essere più leggeri e l'intera superficie dell'auto è stata ricoperta con pannelli solari. Queste auto, insomma, sono molto lontane dalla concezione moderna di automobile.

Nel futuro, per poter realizzare un'auto solare a livello commerciale, occorrerà aumentare il rendimento delle celle fotovoltaiche, diminuire il loro costo, sviluppare celle a combustibile reversibili, funzionanti con elementi o composti non gassosi e non inquinanti facilmente accumulabili in normali serbatoi, realizzare propulsori elettrici semplici che in discesa ed in frenata siano in grado di recuperare l'energia anziché dissiparla in attrito.

Infine il XX secolo è stato poi segnato da diverse tipologie alternative al motore termico (motore Stirling, Wankel, a turbina) che però non ebbero molto successo.

1.2. VEICOLI ELETTRICI

Nel quadro storico appena descritto va riconosciuto al motore a benzina il merito di aver prevalso per oltre un secolo sugli altri tipi di propulsori e probabilmente questo continuerà ad accompagnarci ancora per parecchio tempo. Infatti, proprio a fronte di una serie di innegabili vantaggi questi tipi di propulsori si sono sviluppati maggiormente rispetto alle altre tecnologie.

Al giorno d'oggi, però, i problemi legati ad una serie di fattori hanno dato l'impulso per cercare nuove tecnologie. Tra i molti problemi vale la pena puntare l'attenzione su tre di questi.

- La domanda di energia per il trasporto è in rapida crescita, soprattutto in paesi come Cina ed India.
- Il petrolio è una fonte di energia non rinnovabile e quindi destinata ad esaurirsi ed il suo prezzo tende a crescere con ampie ed imprevedibili oscillazioni.
- La CO₂ prodotta durante i processi di combustione può avere conseguenze drammatiche sul clima.

Soprattutto su quest'ultimo punto si concentrano i problemi maggiori. Secondo l'opinione comune nel mondo scientifico questo gas contribuisce ad accrescere l'effetto serra, procurando un aumento della temperatura media del pianeta che a sua volta può produrre effetti dannosi sul clima.

La strada principale sembra quella di trovare veicoli alternativi rispetto agli attuali. I veicoli elettrici presentano numerosi vantaggi ma il loro limite maggiore è rappresentato dalle batterie. In particolare dalla loro durata e dal loro peso.

1.3. VEICOLI IBRIDI

Come detto uno dei limiti dei veicoli elettrici è senz'altro la scarsa autonomia. Questo problema può essere superato ricorrendo ai veicoli ibridi. Nel veicolo ibrido coesistono due propulsori uno termico ed uno elettrico. L'idea è la stessa del su menzionato Ferdinand Porsche, ma, a fronte di un'idea di più di un secolo fa, questo tipo di veicolo si è sviluppato solo nell'ultimo decennio.

La prima grande distinzione, quando si parla di auto ibride, è tra ibrido serie ed ibrido parallelo.

Nell'ibrido serie (Figura 1.7) il motore termico non è collegato alle ruote, esso ha il compito di generare la corrente per alimentare il motore elettrico che la trasforma in moto, mentre l'energia superflua viene utilizzata per ricaricare le batterie.

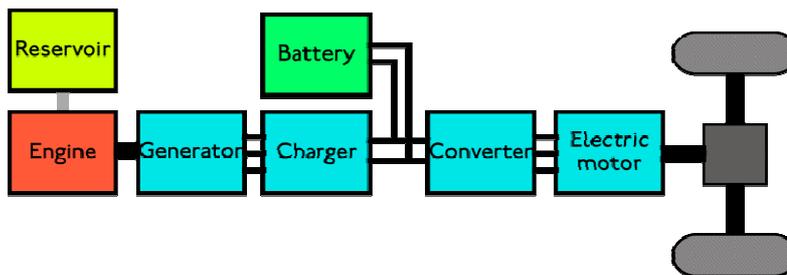


Figura 1.7 - Ibrido Serie

La struttura parallela (Figura 1.8), invece, la più usata nelle auto ibride (Toyota Prius), è caratterizzata dal fatto che entrambi i motori (l'elettrico ed il termico) forniscono coppia alle ruote. Il motore termico può inoltre essere utilizzato per ricaricare le batterie in caso di necessità.

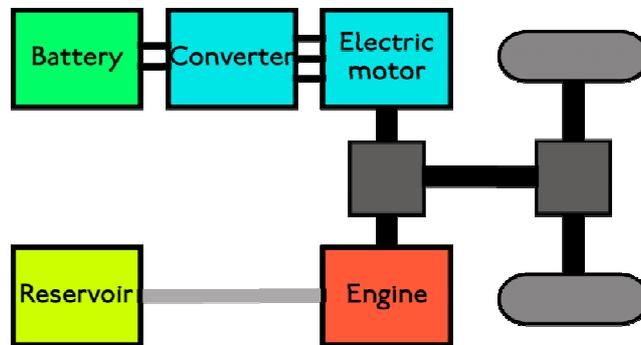


Figura 1.8 - Ibrido Parallelo

Oggi molte, se non tutte, le case automobilistiche mondiali hanno allo studio almeno un'auto ibrida e molti nuovi modelli arriveranno sul mercato entro qualche anno. Non tutte le auto ibride, però, sono uguali e con il progresso tecnologico degli ultimi anni sono nate differenti applicazioni di questa tecnologia.

- Microibride

Le auto microibride sono auto dove la parte elettrica consente la funzione Stop&Start del propulsore termico. Praticamente il motore si spegne quando non serve (ad es. durante l'attesa al semaforo), per poi riaccendersi automaticamente quando si premono l'acceleratore o il pedale della frizione. I vantaggi rispetto una vettura tradizionale sono una ricarica parziale della batteria tramite l'alternatore sfruttando l'energia dispersa in fase di ogni decelerazione e un consumo ridotto del 5%, valore che può aumentare ulteriormente con uso dell'auto prevalentemente cittadino.

- Mild-Hybrid

Queste auto ibride rappresentano il passo successivo rispetto alle micro-ibride. Il propulsore termico, oltre a sfruttare la funzione Stop&Start, viene aiutato da quelli elettrici in fase di accelerazione. Ogni volta l'auto ibrida subisce una decelerazione l'energia, altrimenti dispersa, viene recuperata e utilizzata per ricaricare le batterie.

- Full-Hybrid

Le auto ibride denominate Full-Hybrid sono le uniche in grado di viaggiare in modalità solo elettrica grazie a motori elettrici e batterie più potenti. Questa caratteristica può essere sfruttata principalmente in città, ed è proprio per questo motivo che le auto ibride godono di incentivi statali e possono circolare liberamente anche in quelle città in cui vigono limitazioni al traffico. Attualmente i tragitti percorribili con la sola trazione elettrica sono molto ridotti, in genere non più di qualche chilometro, a causa della limitata capacità delle normali batterie. Tutti i costruttori stanno eseguendo test su prototipi alimentati con batterie al Litio. Grazie alle vantaggiose caratteristiche delle batterie al Litio è nata anche una nuova generazione di auto ibrida denominata "Extended-Range", vetture che normalmente viaggiano in modalità elettrica e sfruttano il motore termico esclusivamente per ricaricare le batterie in caso la loro potenza diventasse insufficiente e non si potesse provvedere ad una ricarica immediata.

- Plug-in

Le auto ibride denominate plug-in si differenziano dalle normali auto ibride "Full Hybrid" per la possibilità di essere ricaricate direttamente alla presa elettrica di casa o presso le speciali colonnine di carica. Avendo a disposizione questa possibilità non è più necessario attendere che il motore termico provveda a recuperare l'energia durante la marcia normale e a ricaricare le batterie.

1.4. VEICOLI IBRIDI SOLARI

Fermo restando quanto detto nei paragrafi precedenti non bisogna trascurare un altro aspetto fondamentale e spesso trascurato. L'inquinamento derivante dalla produzione dell'energia elettrica necessaria al moto dei veicoli siano essi ibridi che elettrici resta se questa energia proviene da centrali elettriche alimentate da combustibili fossili. Questo, infatti, non risolve il problema dell'inquinamento, ma semplicemente lo sposta altrove. Se quest'energia, invece, fosse prodotta da fonti rinnovabili (solare, eolico, idroelettrico, energia dal mare) o dalle biomasse non contribuirebbe alla produzione di CO₂. Un'analisi completa, comunque, deve considerare anche le emissioni connesse alla

costruzione ed alla dismissione degli impianti, anche per le fonti rinnovabili.

La fonte di energia rinnovabile più adatta è l'energia solare (l'uso diretto dell'energia eolica su un veicolo stradale sarebbe certamente più problematico). L'integrazione della fonte solare fotovoltaica, come soluzione in grado di contribuire ulteriormente a ridurre consumi ed emissioni, è una soluzione che non ne esclude altre ma può sommare i propri benefici a quelli ottenibili, per esempio, con i veicoli ibridi o addirittura con quelli convenzionali.

Da qui nasce l'idea dei veicoli ibridi solari. Veicoli in grado di sommare i vantaggi dei veicoli ibridi con la tecnologia fotovoltaica. In questo caso la presenza dei pannelli riduce i consumi di energia, le emissioni di CO₂ rispetto ad un ibrido e ne migliora l'autonomia riducendo i tempi di ricarica.



*Figura 1.9 - Viking 23
Western Washington University*



*Figura 1.10 - Ultra-Commuter
The University of Queensland*



Figura 1.11 - Astrolab Venturi



Figura 1.12 - Solar Prius

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

Inoltre si può anche considerare che la maggior parte degli automobilisti usa l'auto per meno di un'ora al giorno e viaggia da solo: in queste condizioni l'energia captabile dai pannelli solari durante la guida e, soprattutto, in fase di parcheggio, rappresenta una frazione significativa dell'energia spesa per la propulsione.

Ma questo veicolo si può rendere utile anche quando è fermo: si può usare il surplus di energia ottenuta dai pannelli per rivenderla all'ENEL o per aumentare l'utenza domestica e tagliare la bolletta elettrica, o azionare il motore/generatore a bordo per produrre energia elettrica e recuperare l'energia termica per uso domestico (cogenerazione), risparmiando sulle bollette energetiche.

Per tutti questi motivi molti progetti di veicoli ibridi solari sono stati portati avanti a partire dagli anni '90. Tra questi sono da ricordare quello della Western Washington University (Figura 1.9), della University of Queensland (Figura 1.10), della Venturi in Francia (Figura 1.11) ed in Italia presso l'Università di Salerno. Inoltre la Toyota ha presentato un modello di Prius con i pannelli solari, Solar Prius appunto (Figura 1.12), in cui i pannelli azionano i sistemi di ventilazione e condizionamento (con benefici indiretti su consumi ed emissioni).

1.5. PROTOTIPO UNISA

Questo veicolo (Figura 1.13) è stato sviluppato nell'ambito di un progetto europeo Leonardo con finalità didattiche e formative [4]. Il progetto ha visto la partecipazione di molti partner da università europee fino ad aziende ed altri enti.



Figura 1.13 - Prototipo di HSV dell'Università di Salerno

Il prototipo è stato realizzato convertendo un veicolo elettrico (Porter Van Glass della Microvett). Sono stati inseriti un tetto fotovoltaico, un gruppo moto-generatore ed un sistema di controllo e acquisizione dati.

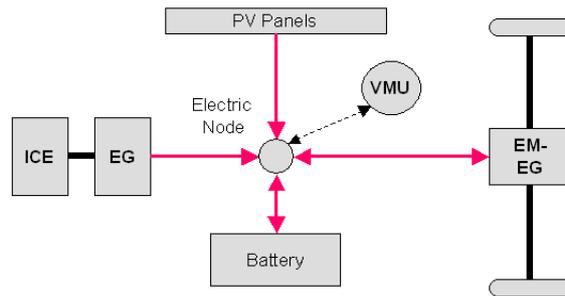


Figura 1.14 - Schema prototipo ibrido serie

In Figura 1.14 vi è una descrizione dei flussi di energia. Il veicolo presenta una struttura di tipo ibrido serie. Come detto, quindi, il motore elettrico (EM) fornisce il moto alle ruote e funziona da generatore elettrico (EG) durante le fasi di frenata e decelerazione. Nel vano posteriore troviamo un gruppo moto-generatore (ICE-EG) che fornisce l'energia elettrica necessaria successivamente alla trazione e a ricaricare la batteria. Sul tetto del veicolo sono montati una serie di pannelli solari. Questa ultima peculiarità rende il veicolo un ibrido solare (HSV Hybrid Solar Vehicle). Nel nodo elettrico (EN) confluisce anche l'energia elettrica proveniente dai pannelli solari che contribuisce alla trazione e alla ricarica della batteria. La ricarica può essere effettuata anche dalla rete elettrica (Plug-In). Un sistema di controllo (VMU Vehicle Management Unit) coordina i flussi di energia e l'accensione e lo spegnimento del gruppo moto-generatore, in funzione dello stato di carica della batteria (SOC), della potenza richiesta dal veicolo e dal contributo di energia solare atteso.

2. L'ENERGIA SOLARE

2.1. L'ENERGIA

L'energia usata sinora viene ricavata da combustibili fossili che però hanno due svantaggi: sono una delle maggiori fonti d'inquinamento e sono anche delle fonti esauribili. Questi motivi hanno spinto l'uomo a cercare di utilizzare altri tipi di energia, che sono delle fonti inesauribili e che inoltre non provocano danni all'ambiente.

2.2. FONTI DI ENERGIA RINNOVABILE

Le fonti rinnovabili di energia sono quelle fonti che, a differenza dei combustibili fossili, possono essere considerate virtualmente inesauribili e che hanno un impatto sull'ambiente trascurabile.

Comprendono l'energia solare e quelle che da essa derivano: l'energia idraulica, eolica, delle biomasse, delle onde e delle correnti. Inoltre, sono considerate tali anche l'energia geotermica, i rifiuti e l'energia dissipata sulle coste dalle maree. Con opportune tecnologie le fonti rinnovabili di energia possono essere convertite in energia secondaria utile che può essere termica, elettrica, meccanica e chimica.

L'energia solare è presente sia in forma diretta sia in forma indiretta.

Sono forme di energia solare indiretta l'energia eolica e idrica. L'energia solare viene accumulata anche dalla biomassa, ossia materiale organico di origine vegetale, come le piante o i residui agricoli e urbani, attraverso i processi di fotosintesi clorofilliana. La forma diretta è semplicemente quella associata alla luce e al calore che si percepisce quando si è in presenza del sole.

Entrambe queste forme sono da considerarsi fonti di energia rinnovabili perché si rigenerano, dopo l'utilizzo, su una scala di tempi umana: cioè si rigenerano o in maniera istantanea o con qualche ora di ritardo (ciò accade quando un corpo accumula calore durante il giorno e lo rilascia durante la notte). L'energia eolica e l'energia idrica sono due forme di energia solare indiretta perché la prima ha origine dal non omogeneo e variabile riscaldamento della terra da parte del sole, la seconda, che è l'energia posseduta dall'acqua in presenza di un dislivello, è un fenomeno possibile solo grazie al sole, il cui calore alimenta il ciclo delle acque. Infine l'energia da biomassa non è altro che energia solare

immagazzinata, grazie alla fotosintesi, nei tessuti vegetali delle piante. Invece l'energia dei combustibili fossili, anche se deriva anch'essa dall'energia solare, essendo quella parte di energia immagazzinata nella biomassa e sottoposta, nel corso di milioni di anni, a processi chimici e geologici, non può essere considerata rinnovabile.

2.3. L'ENERGIA SOLARE

Il protocollo di Kyoto [5], l'Unione Europea con il suo programma 20-20-20, e tutte le conferenze susseguitesi in tema di problematiche energetico - ambientali, hanno individuato nel ricorso alle energie rinnovabili una delle soluzioni più efficaci per ridurre il consumo dei combustibili fossili e le conseguenze dannose dell'effetto serra.

Le potenzialità dell'energia solare sono enormi, basti pensare che i circa 89.000 TW di radiazione solare, che incidono sulla terra, superano di circa 6.000 volte gli attuali consumi di energia del pianeta [6].

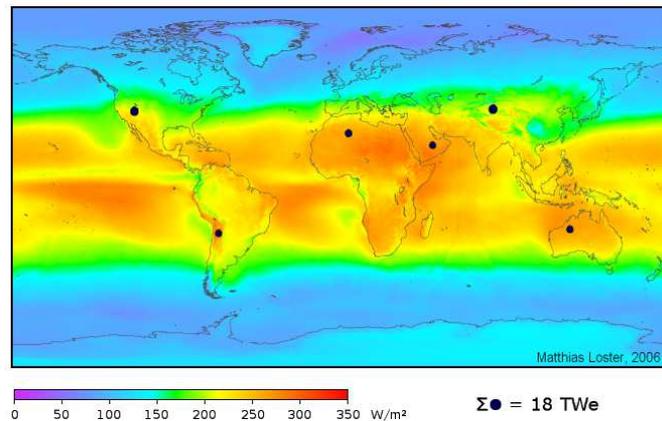


Figura 2.1 - Distribuzione della radiazione solare sulla Terra

Inoltre l'energia solare è distribuita in modo più uniforme rispetto per esempio all'uranio o ad altre risorse fossili. Basti pensare che se i puntini neri presenti in Figura 2.1 fossero convertiti in zone fotovoltaiche, sarebbero in grado di soddisfare la domanda mondiale totale di energia primaria con l'energia solare.

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

2.3.1. LA RADIAZIONE SOLARE

Quella che comunemente viene chiamata Radiazione Solare è tecnicamente conosciuta come Radiazione Solare Globale ed è una misura dell'intensità della radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre. La Radiazione Solare Globale che si misura include due componenti la Radiazione Solare Diretta e la Radiazione Solare Diffusa.

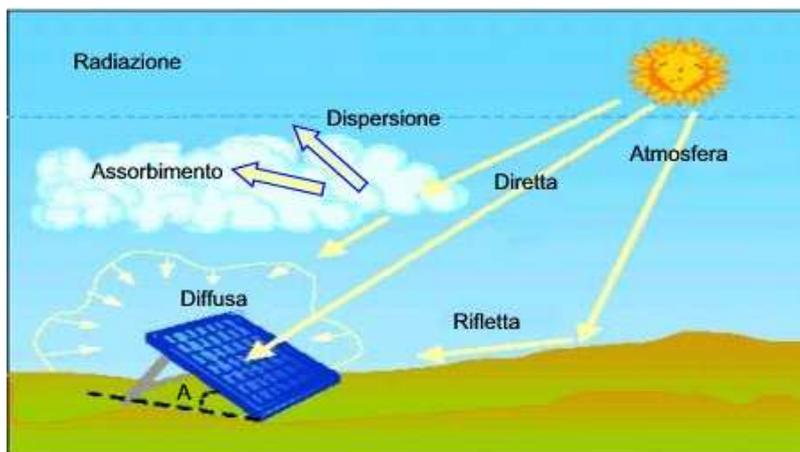


Figura 2.2 - Radiazione Solare

Quando la radiazione solare attraversa l'atmosfera terrestre parte di essa viene assorbita o diffusa dalle molecole di aria, vapore acqueo, aerosol e nubi.

La parte di radiazione solare che raggiunge direttamente la superficie terrestre viene chiamata Radiazione Solare Diretta mentre la parte della stessa radiazione che è stata diffusa dall'atmosfera, raggiungerà la superficie terrestre come Radiazione Solare Diffusa. La Radiazione Solare Globale viene misurata con uno strumento chiamato piranometro: l'energia che colpisce il sensore, una volta integrata e riferita a un dato periodo di tempo, esprime la potenza della radiazione misurata in Wh/m^2 .

L'energia ricevuta viene misurata in una banda spettrale tra i 400 e i 1100 nm (nanometri) che comprende tutto il visibile (400-700 nm) e parte del vicino infrarosso.

La Radiazione Solare è un parametro meteorologico importante dato che influenza direttamente la temperatura dell'aria e di conseguenza molti parametri meteorologici. Essa dipende da parametri di tipo astronomico -

geografico, come latitudine, quota, stagione e data, e da parametri di tipo meteorologico, quali nuvolosità e chiarezza dell'atmosfera [7].

Oltre alla Radiazione Solare Diretta e Diffusa, c'è una componente detta Radiazione Solare Riflessa.

Le proporzioni di radiazione riflessa, diffusa e diretta dipendono da:

- Condizioni meteorologiche: influenzano le proporzioni di radiazione riflessa, diffusa e diretta. 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.
- Inclinazione della superficie: influenza le proporzioni di radiazione riflessa, diffusa e diretta. Rispetto al piano orizzontale una superficie orizzontale riceve la massima radiazione diffusa e la minima riflessa, la componente riflessa aumenta al crescere dell'inclinazione.
- Presenza di superfici riflettenti: influenza le proporzioni di radiazione riflessa, diffusa e diretta. Il contributo maggiore alla riflessione è dato da superfici chiare, così la radiazione riflessa aumenta in inverno, per la presenza della neve, e diminuisce in estate per effetto di assorbimento di colori scuri quali quello dell'erba o del terreno.

2.3.2. L'ENERGIA UTILE

La quantità di energia solare che arriva sulla superficie terrestre e che può essere utilmente "raccolta" da un dispositivo fotovoltaico dipende dall'irraggiamento del luogo.

L'irraggiamento è, infatti, la quantità di energia solare incidente su una superficie unitaria in un determinato intervallo di tempo, tipicamente un giorno ($\text{kWh/m}^2/\text{giorno}$). Il valore istantaneo della radiazione solare incidente sull'unità di superficie viene, invece, denominato radianza (kW/m^2). L'irraggiamento è influenzato dalle condizioni climatiche locali (nuvolosità, foschia ecc.) e dipende dalla latitudine del luogo, cresce cioè quanto più ci si avvicina all'equatore. In Italia, l'irraggiamento medio annuale varia dai $3,6 \text{ kWh/m}^2/\text{giorno}$ della pianura padana ai $4,7$

kWh/m²/giorno del centro Sud e ai 5,4 kWh/m²/giorno della Sicilia (Figura 2.3).

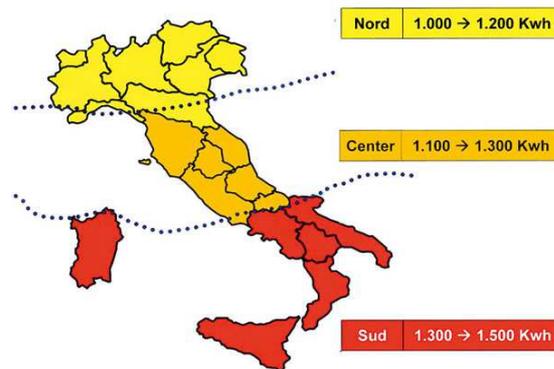


Figura 2.3 - Radiazione Solare Annua

Nel nostro paese, quindi, le regioni ideali per lo sviluppo del fotovoltaico sono quelle meridionali e insulari anche se, per la capacità che hanno di sfruttare anche la radiazione diffusa, gli impianti fotovoltaici possono essere installati anche in zone meno soleggiate. In località favorevoli è possibile raccogliere annualmente circa 2000kWh da ogni metro quadrato di superficie, il che è l'equivalente energetico di 1,5 barili di petrolio per metro quadrato.

2.4. LE TECNOLOGIE

Per tecnologia solare s'intende qualsiasi dispositivo che consente di trasformare l'energia solare diretta, o le sue forme indirette (eolica, idrica e biomassa), in forme di energia utili all'uomo: calore, elettricità, combustibili. Gli impianti solari termici convertono l'energia solare diretta in energia termica, cioè calore, da impiegare per produrre acqua calda per il riscaldamento degli edifici, o per la produzione di energia elettrica: riscaldamento termosolare, collettori a tubi sottovuoto, collettori a piastra, collettori monoblocco ad accumulo, collettori termosolari, generatore termico solare, torri solari, sistema a pannelli termofotovoltaici, concentratori parabolici ad inseguimento, specchi parabolici lineari, sistema a concentratori parabolici, sistema solar pond, ecc.

I generatori eolici non sono altro che la versione moderna dei mulini a vento, vengono impiegati per convertire l'energia eolica in energia meccanica o, più spesso, in energia elettrica. Gli impianti mini-idroelettrici sono impianti di piccole dimensioni che consentono di utilizzare piccoli salti idrici per produrre energia elettrica. Gli impianti a biomassa convertono la legna, i residui agricoli o i rifiuti urbani, in calore o elettricità per mezzo di processi che vanno dalla combustione alla gassificazione.

2.4.1. IL SOLE PER LE AUTO

In linea di principio, l'energia solare potrebbe essere utilizzata su un'auto secondo due modalità differenti:

- Solare termodinamico: l'energia solare, attraverso i pannelli solari a concentrazione, riscalda un fluido di lavoro, operante in un ciclo termodinamico diretto, per la produzione di energia meccanica.
- Solare fotovoltaico: l'energia radiante è convertita in energia elettrica, tramite le celle fotovoltaiche, e utilizzata per muovere un motore elettrico (ovvero immagazzinata in una batteria per un utilizzo successivo).

La seconda opzione sembra poter avere una pratica applicazione, visti i vincoli d'ingombro e operativi legati al solare termodinamico.

2.5. IL FOTOVOLTAICO

2.5.1. CHE COS'È IL FOTOVOLTAICO?

La tecnologia fotovoltaica (FV) consente di trasformare direttamente la luce solare in energia elettrica. Essa sfrutta il cosiddetto effetto fotovoltaico che è basato sulle proprietà di alcuni materiali semiconduttori (fra cui il silicio, elemento molto diffuso in natura) che, opportunamente trattati, sono in grado di generare elettricità se colpiti dalla radiazione solare, senza quindi l'uso di alcun combustibile. Il dispositivo più elementare capace di operare una tale conversione è la cella fotovoltaica che è in grado di erogare tipicamente $1 \div 1,5$ W di potenza quando è investita da una radiazione di 1000 W/m^2 (condizioni standard

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

d'irraggiamento). Più celle assemblate e collegate in serie tra loro in un'unica struttura formano il modulo fotovoltaico. Se le celle sono collegate in serie dal negativo (-) al positivo (+) la tensione complessiva aumenta. I moduli sono abitualmente assemblati in modo da fornire 12÷24 V. Un modulo tipo, formato da 36 celle, ha una superficie di circa mezzo metro quadrato ed eroga, in condizioni ottimali, circa 40÷50 W. Un metro quadrato di moduli produce un'energia media giornaliera tra 0,4÷0,6 kWh, in funzione dell'efficienza di conversione e dell'intensità della radiazione solare. Un insieme di moduli, connessi elettricamente tra loro, costituisce il campo fotovoltaico (FV) che, insieme ad altri componenti meccanici, elettrici ed elettronici, consente di realizzare i sistemi FV. Il sistema FV, nel suo insieme, capta e trasforma l'energia solare disponibile e la rende utilizzabile per l'utenza sotto forma di energia elettrica. La sua struttura può essere molto varia a seconda del tipo di applicazione.

2.5.2. IMPIANTO FOTOVOLTAICO

La quantità di energia prodotta da un generatore fotovoltaico varia nel corso dell'anno e dipende da una serie di fattori come la latitudine e l'altitudine del sito, l'orientamento e l'inclinazione della superficie dei moduli, e le caratteristiche di assorbimento e riflessività del territorio circostante. La Figura 2.4 dà un'indicazione di massima della "capacità produttiva" di un impianto fotovoltaico connesso alla rete.

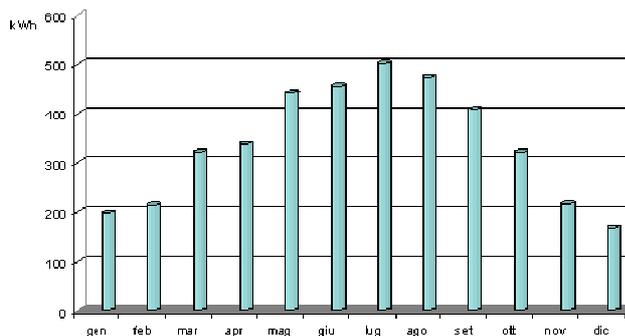


Figura 2.4 - Energia mensile da un impianto connesso a rete

Di seguito, invece, vengono indicati (Tabella 2-1), per tre localizzazioni diverse, i kWh elettrici generati mediamente in un anno e

immessi in rete, per ogni metro quadrato di moduli in silicio monocristallino e in silicio policristallino, per un impianto di potenza nominale pari ad 1 kWp (si tenga conto che esso corrisponde a circa 8 m² di moduli in silicio cristallino e a 10 m² di quelli in silicio policristallino).

A titolo indicativo alle latitudini dell'Italia centro-meridionale un metro quadrato di moduli può produrre in media 0,3÷0,4 kWh al giorno nel periodo invernale, e 0,6÷0,8 kWh in quello estivo [8].

Tabella 2-1 - Capacità Produttiva di un Impianto Fotovoltaico

Localizzazione impianto	Modulo silicio		Energia Utile per 1 kWp installato [kWh/kWp/anno]
	Monocristallino [kWh/m ² /anno]	Policristallino [kWh/m ² /anno]	
Nord	150	130	1080
Centro	190	160	1350
Sud	210	180	1500

2.6. I PANNELLI FOTOVOLTAICI

La conversione dalla radiazione solare in elettricità è basata sulle ricerche condotte presso i Laboratori Bell negli anni '50, quando il principio scoperto dal fisico francese Alexandre - Edmond Becquerel venne applicato per la prima volta.

I pannelli fotovoltaici, il cui funzionamento è basato sulle proprietà di semi-conduttore del silicio e di altri materiali, furono usati inizialmente per le applicazioni spaziali. La diffusione di questa tecnologia è cresciuta in modo esponenziale negli ultimi anni, grazie alla pressante necessità di energia rinnovabile e carbon-free.

Le vendite di pannelli fotovoltaici hanno raggiunto i 37 miliardi di dollari nel 2009. Il primato nelle installazioni di impianti fotovoltaici spetta alla Germania, con più del 50% complessivo, mentre l'Europa ne assomma circa il 70%. L'Italia è attualmente il terzo paese europeo, dopo Germania e Spagna, ed il quinto a livello mondiale. La maggior parte delle celle fotovoltaiche (circa il 32%, nel 2009) è invece prodotta in Cina, che insieme a Taiwan raggiunge il 45% della produzione complessiva, mentre l'Europa ne produce il 50% in più del Giappone. La

diffusione della tecnologia è stata accompagnata da una riduzione dei costi e dei prezzi, a sua volta favorita dall'ampliamento del mercato.

La maggior parte delle celle fotovoltaiche attuali, che fa uso di silicio policristallino, presenta efficienze di conversione variabili tra il 10% ed il 19% circa, mentre il ricorso al silicio mono-cristallino permette incrementi di efficienza dell'ordine del 4% circa. L'uso del silicio amorfo permette di integrarlo anche su superfici estese e diverse dal vetro, e di realizzare dei film trasparenti per la luce visibile [9].

La Figura 2.5 mostra il trend di crescita dell'efficienza di conversione per le diverse tecnologie sperimentate. Il ricorso a celle a tripla giunzione multipla in condizioni di luce concentrata, e con materiali quali l'arseniuro di gallio, ha consentito di raggiungere efficienze di conversione anche superiori al 40%. Si tratta, però, di soluzioni per adesso disponibili a costi molto elevati.

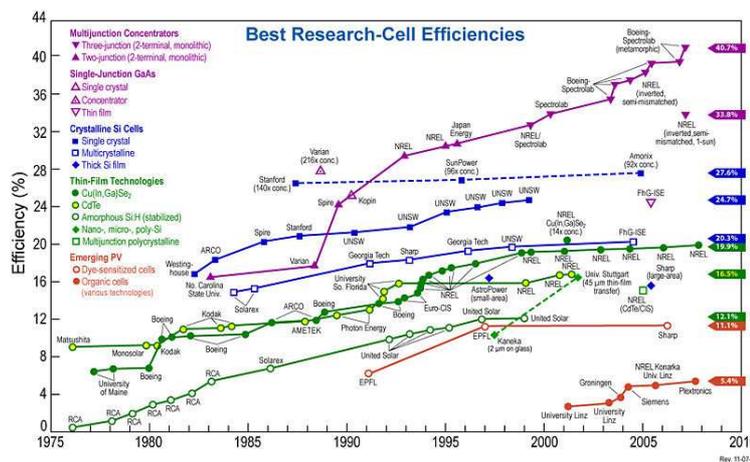


Figura 2.5 - Trend dei rendimenti di conversione delle celle PV

Non mancano proposte avveniristiche, come quella di sostituire l'asfalto delle strade con pannelli solari integrati in appositi supporti trasparenti, in grado di assicurare la resistenza meccanica e l'aderenza necessaria per permettere il passaggio degli autoveicoli. Con il vantaggio di poter integrare dei LED per le segnalazioni luminose e delle resistenze per riscaldare l'asfalto in presenza di neve o ghiaccio. E magari con la possibilità di ricaricare le batterie con tecniche di induzione, senza contatto diretto, come fanno alcuni apparecchi per la ricarica dei telefoni cellulari. Nell'Idaho ci stanno lavorando [10].

Una valutazione più attenta di una tecnologia energetica deve però considerare anche l'impatto energetico ed ambientale legato all'intero ciclo di vita del prodotto (LCA, Life Cycle Analysis). In altre parole, è necessario valutare il tempo necessario a recuperare l'energia spesa per costruire, mettere in opera e smaltire l'impianto (Energy Pay Back Time, EPBT). Diversi studi [11] mostrano come questo tempo, pur variabile in funzione delle tecniche di produzione e lavorazione e delle modalità di produzione energetica nei paesi interessati dal ciclo di fabbricazione del pannello, sia sensibilmente minore del tempo medio di vita di un pannello stesso (stimato in circa 20 anni). Si può quindi concludere che questa tecnologia comporti un guadagno netto in termini di impatto energetico/ambientale.



Figura 2.6 - Solar Road

E' quindi naturale interrogarsi su come l'energia solare fotovoltaica possa essere utilizzata per muovere le automobili.

2.7. ENERGIA SOLARE PER LE AUTO

Lo scetticismo che in genere accompagna l'uso dell'energia solare in ambito automobilistico è dovuto al fatto che la potenza di un pannello solare ospitabile su un'automobile di dimensioni normali, circa 300 W, è molto inferiore alla potenza di una vettura di media cilindrata, dell'ordine di 60 kW (circa 80 CV).

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

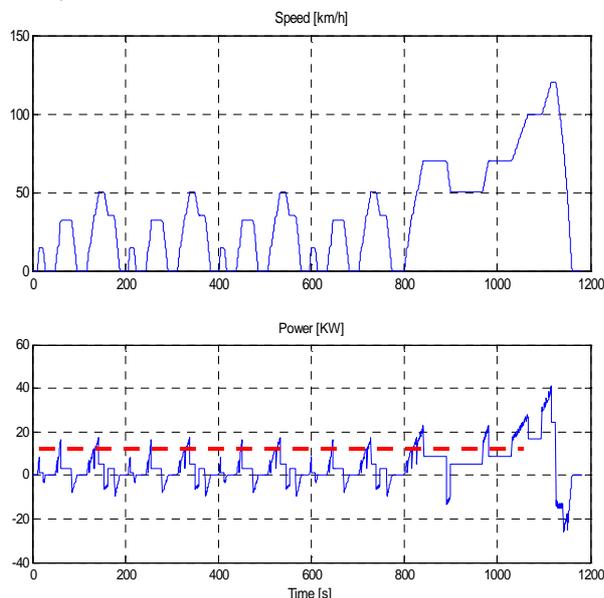
In pratica la potenza del pannello è circa lo 0,5% di quella dell'auto (Tabella 2-2) . Ma questa constatazione è tanto elementare quanto fuorviante: sarebbe corretto ragionare così se entrambi i sistemi operassero sempre alla massima potenza.

In realtà la maggior parte degli automobilisti usa l'auto prevalentemente in città, per non più di un'ora al giorno e quasi sempre con il solo guidatore a bordo (statistiche del governo inglese [12]).

Tabella 2-2 - Contributo solare per un'auto in un tipico utilizzo urbano

	Potenza [kW]	Potenza Media [kW]	Tempo [h/giorno]	Energia [kWh/giorno]
Auto	0	8	1	8
Pannello Solare	0,3	0,2	10	2
% Solare	0,004	2,5	1000%	25%

In queste condizioni, la potenza "media" necessaria in ambito urbano (la parte in rosso nella Figura 2.7) è pari a circa 8 kW, considerando il parziale recupero della potenza con la frenata rigenerativa. Se la vettura è usata un'ora al giorno, l'energia necessaria alla trazione è pari quindi a 8 kWh (Tabella 2-2).



*Figura 2.7 - Potenza necessaria alla trazione e potenza media nel tratto urbano (linea rossa).
Ciclo medio europeo ECE-EUDC*

Nemmeno il pannello però lavora sempre in condizioni di massima potenza, quanto meno perché di notte il sole va via. Se consideriamo però un pannello esposto in luogo soleggiato (curva viola, Figura 2.8), vediamo che l'energia ricavabile (equivalente all'area sottesa dalla curva viola) è grosso modo pari a quella ottenibile in dieci ore giornaliere operando ad una potenza pari a $2/3$ della potenza massima.

Quindi, nel caso di un pannello con potenza massima di 300 W, possiamo stimare l'energia giornaliera ottenibile in una giornata media moltiplicando la potenza media (200 W) per le ore, ottenendo un'energia giornaliera di 2 kWh. Il pannello fotovoltaico può fornire quindi circa il 25% dei circa 8 kWh richiesti per la trazione, valore ben maggiore dello 0,5% che un'analisi apparentemente di buon senso, ma superficiale perché basata solo sulla potenza massima, gli avrebbe attribuito (Tabella 2-2).

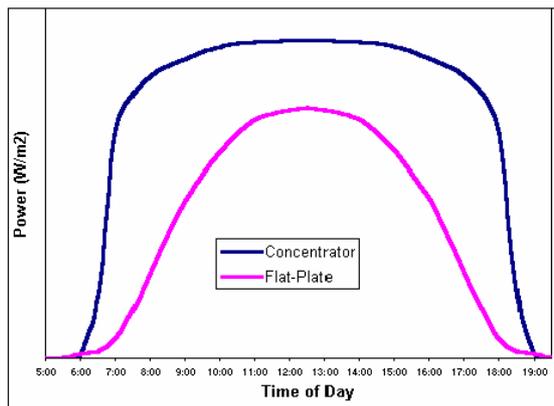


Figura 2.8 - Andamento giornaliero qualitativo della potenza ottenibile da un pannello solare.

È anche evidente come questa analisi, per avere il pregio della semplicità, perda qualcosa in rigore ed in precisione, fornendo delle indicazioni medie e di massima: il contributo solare varierà ovviamente con la stagione, e dipenderà dall'uso che si farà del veicolo, in termini di ore di guida, di tipo di percorso e, ovviamente, di modalità di parcheggio. Diamo quindi per scontato che si dovranno cambiare alcune abitudini, ed evitare per esempio di chiudere la macchina in garage quando fuori c'è il sole. E diamo anche per scontato che il potenziale acquirente non viva in

Alaska o vicino Capo Nord: ma, come vedremo più avanti, questa soluzione non interessa solo chi vive in California, in Sicilia o nei paesi tropicali.

2.8. LE BATTERIE

L'energia prodotta dai moduli fotovoltaici viene immagazzinata nelle batterie, per renderla disponibile quando non c'è sufficiente illuminazione.

La batteria è l'elemento più critico di tutto il sistema, l'unico che esige manutenzione.

I requisiti principali sono:

- Costante disponibilità ad assorbire ed erogare energia elettrica in grandi e piccole quantità.
- Erogazione di corrente sufficientemente grande.
- Lunga durata di vita nel funzionamento ciclico.
- Esercizio con poca manutenzione.
- Costi minimi.

Tra le batterie disponibili sul mercato, la più idonea risulta sempre la batteria al piombo, grazie soprattutto al rendimento di carica e scarica e al rapporto tra prezzo e prestazioni.

2.9. I BENEFICI AMBIENTALI

L'energia elettrica prodotta con il fotovoltaico ha un costo nullo per combustibile: per ogni kWh prodotto si risparmiano circa 250 g di olio combustibile e si evita l'emissione di circa 700 g di CO₂, e di altri gas responsabili dell'effetto serra, con un sicuro vantaggio economico e soprattutto ambientale per la collettività. Si può valutare in 30 anni la vita utile di un impianto (ma molto probabilmente essi dureranno molto di più); il che significa che un piccolo impianto da 1,5 kWp, in grado di coprire i due terzi del fabbisogno annuo di energia elettrica di una famiglia media italiana (2500 kWh), produrrà, nell'arco della sua vita efficace, quasi 60000 kWh, con un risparmio di circa 14 tonnellate di combustibili fossili, evitando l'emissione di circa 40 t CO₂.

3. LABVIEW®

LabVIEW è un ambiente di programmazione grafica, della National Instruments, utilizzato da milioni di ingegneri e scienziati, in diversi settori industriali, al fine di sviluppare sofisticati sistemi di misurazione, di test e di controllo attraverso un'interfaccia intuitiva con icone grafiche e fili che ricordano la struttura dei diagrammi di flusso.

LabVIEW è in grado di offrire un'integrazione con migliaia di dispositivi hardware di controllo e misura. Fornisce, inoltre, centinaia di librerie integrate, funzioni di analisi avanzata e visualizzazione dei dati, tutti per la creazione di strumentazione virtuale. È possibile, inoltre, memorizzare i dati su report e database ed eseguire LabVIEW anche su sistemi embedded o real-time [13].

3.1. COS'È LABVIEW?

LabVIEW è un linguaggio di programmazione grafica che utilizza icone invece di linee di testi per creare applicazioni. In contrasto con i linguaggi di programmazione testuali, in cui le istruzioni determinano l'esecuzione del programma, LabVIEW utilizza la programmazione basata sul flusso di dati, in cui è il flusso dei dati stesso a determinare l'esecuzione.

Per capire meglio come viene strutturata la programmazione in LabVIEW si fa riferimento alla struttura a tre layer (Figura 3.1):

1. Livello Utente;
2. Livello Real time;
3. Livello FPGA.

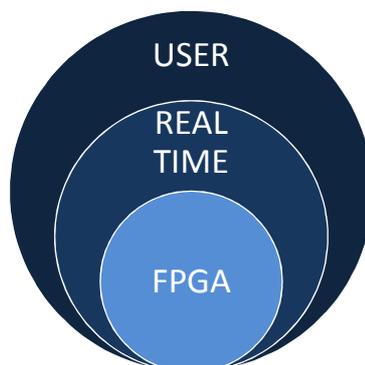


Figura 3.1 - Struttura a tre layer

LabVIEW lavora su un concetto largamente impiegato in informatica che prende il nome di Information Hiding. L'information Hiding è un criterio per scomporre un sistema software in moduli. Ogni modulo dovrebbe nascondere i dettagli dell'implementazione che sono suscettibili di cambiamento. Ogni variabile decisionale è chiamata segreto del modulo. In questo modo quindi si nasconde l'implementazione dietro un'interfaccia che non cambia, anche se cambia l'implementazione .

Quindi lo scopo di ogni livello è quello di offrire determinati servizi ai livelli superiori, schermando i dettagli dell'implementazione (Information Hiding), ed ogni strato è una specie di macchina virtuale che offre servizi al livello sovrastante e richiede servizi dal livello sottostante [14].

Il livello FPGA si occupa della comunicazione tra i moduli e la FPGA del CompactRIO

Il Livello Real Time invece chiede servizi al livello sottostante (FPGA), in particolare, chiede che gli siano passati i valori dei vari trasduttori connessi ai moduli del CompactRIO. Tali misure vengono prima calibrate e poi memorizzate in un file di testo con una certa frequenza di memorizzazione.

Infine a livello utente vengono create le VI (Virtual Instruments) cioè gli algoritmi che vengono compilati in forma grafica visualizzabile e compilabile solo da LabVIEW.

3.2. STRUMENTI VIRTUALI

In LabVIEW realizzare un'interfaccia utente è molto semplice utilizzando un insieme di strumenti e di oggetti. L'interfaccia utente è nota come pannello frontale (front panel). Si può aggiungere codice utilizzando la rappresentazione grafica delle funzioni per controllare gli oggetti del pannello frontale. Lo schema a blocchi (block diagram) contiene questo codice. Quest'ultimo assomiglia, quindi, in una certa misura ad un diagramma di flusso.

I programmi realizzati in LabVIEW vengono chiamati strumenti virtuali (Virtual Instruments, VI). I VI contengono tre componenti principali: il pannello frontale, lo schema a blocchi e l'icona con il riquadro connettori.

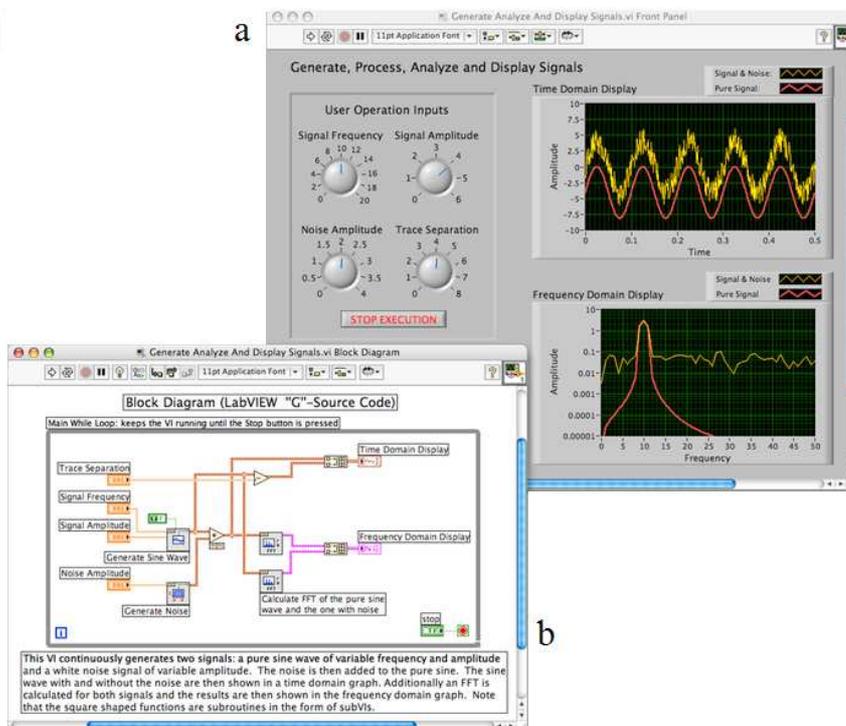


Figura 3.2 - Front Panel e Block Diagram

3.2.1. FRONT PANEL

Il pannello frontale (Figura 3.2 a) è composto da controlli e indicatori, che costituiscono, rispettivamente, i terminali interattivi di ingresso e uscita, del VI. I controlli e indicatori sono inseriti mediante la Palette Controls. Possiamo identificare vari tipi di controlli e indicatori, in base ai dati che gestiscono.

I controlli simulano dispositivi d'ingresso degli strumenti e forniscono dati allo schema a blocchi del VI.

Gli indicatori simulano i dispositivi di uscita degli strumenti e visualizzano i dati che lo schema a blocchi acquisisce o genera.

3.2.2. BLOCK DIAGRAM

Lo schema a blocchi (Figura 3.2 b) si compone di nodi, terminali e fili di collegamento.

I nodi sono oggetti dello schema a blocchi che possiedono ingressi e/o uscite ed eseguono operazioni quando un VI è in esecuzione.

I terminali sono la rappresentazione degli oggetti del pannello frontale nel block diagram. I terminali rappresentano il tipo di dato del controllo o dell'indicatore. I terminali sono porte di ingresso o uscita che scambiano informazioni tra pannello frontale e lo schema a blocchi.

I fili di collegamento servono a trasferire dati fra gli oggetti dello schema a blocchi. Essi sono simili alle variabili nei linguaggi di programmazione testuali. Ogni filo possiede un'unica sorgente di dati. I fili hanno colori, stili e spessori diversi in funzione al dato letto.

3.3. AMBIENTE LABVIEW

Dopo aver costruito il pannello frontale, viene aggiunto il codice utilizzando le rappresentazioni grafiche delle funzioni per controllare gli oggetti del pannello frontale. Lo schema a blocchi contiene il codice sorgente in formato grafico. Gli oggetti del pannello frontale appaiono come terminali. Il terminale scompare solo dopo aver cancellato l'oggetto corrispondente sul pannello frontale. Gli oggetti del block diagram, comprendono terminali, subVI, funzioni, costanti, strutture e collegamenti che trasferiscono i dati fra gli altri oggetti dello schema a blocchi.

Dopo aver costruito il pannello frontale e lo schema a blocchi, viene creata l'icona (Figura 3.3) e il riquadro dei connettori per poter utilizzare il VI all'interno di un altro VI.

Un VI all'interno di un altro VI viene chiamato subVI. Un subVI corrisponde a una subroutine nei linguaggi di programmazione testuali tradizionali e al concetto di incapsulamento nei linguaggi ad oggetto. Ogni VI visualizza un'icona mostrata nell'angolo superiore destro della finestra, essa è una rappresentazione grafica del VI, può contenere testo e/o immagini. Utilizzando un VI come subVI, l'icona identifica il subVI nello schema a blocchi del VI.

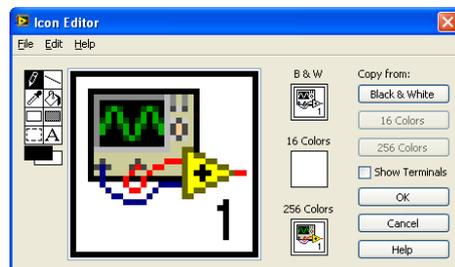


Figura 3.3 - Editor delle icone dei SubVI

Il riquadro dei connettori (Figura 3.4) è un insieme di terminali che corrispondono ai controlli e indicatori di quel VI. Il riquadro dei connettori definisce gli ingressi e le uscite che si possono collegare al VI in maniera tale da poterlo usare come subVI.

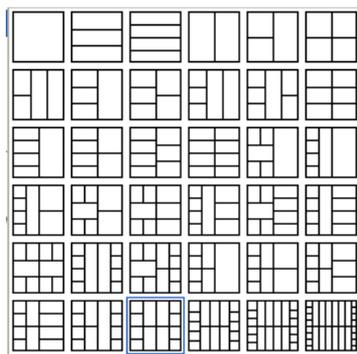


Figura 3.4 - Riquadro dei connettori

La potenza di LabVIEW sta nella natura gerarchica del VI. Dopo aver creato un VI, si può utilizzare come subVI nello schema a blocchi di un VI ad alto livello, non c'è limite al numero di livelli nella gerarchia. L'utilizzo di subVI consente di eseguire modifiche e a verificare lo schema a blocchi rapidamente.

Quando si creano VI, una certa operazione potrebbe essere ripetuta frequentemente, per cui è utile il concetto di subVI e/o di cicli per eseguire quell'operazione ripetute volte.

3.4. SISTEMA NI COMPACTRIO

Il CompactRIO (Figura 3.5) è una piattaforma PAC (Programmable Automation Controller) di National Instruments ed è un sistema embedded per il controllo avanzato e l'acquisizione dati, progettato per applicazioni che richiedono alte prestazioni ed affidabilità. Grazie all'architettura aperta ed embedded ed alle caratteristiche di sistema compatto, robusto e flessibile, ingegneri e sviluppatori embedded possono usare hardware commerciali per realizzare velocemente sistemi personalizzati. NI CompactRIO si basa sulle tecnologie LabVIEW FPGA e LabVIEW Real-Time di National Instruments ed offre la possibilità di progettare, programmare e personalizzare il sistema embedded CompactRIO con la facilità d'uso degli strumenti di programmazione grafica [13].



Figura 3.5 - CompactRIO

Il CompactRIO comprende tre macro componenti:

1. Moduli input/output intercambiabili.
2. Field Programmable Gate Array (FPGA).
3. Un processore embedded real time.

3.5. MODULI I/O

Nel presente lavoro sono stati utilizzati 3 moduli I/O il cui utilizzo sarà illustrato più avanti.

3.5.1. NI 9205

Il modulo NI 9205 (Figura 3.6) della National Instruments è un modulo di input analogici dotato di 32 input a terminazione singola o di 16 differenziali, a 16 bit di risoluzione e di una frequenza massima di campionamento di 250 kS/s. Ogni canale del modello NI 9205 include una protezione da sovratensioni fino a 60 V tra i canali di input e il COM (Common).

3.5.2. NI 9401

Il modulo NI 9401 (Figura 3.7) della National Instruments è un modulo di input digitale bidirezionale a 8 canali, a 100 ns adatto a qualsiasi chassis CompactRIO. È possibile programmare NI 9401 per tre configurazioni: otto input digitali, otto output digitali o quattro input digitali e quattro output digitali.

3.5.3. NI 9263

Il modulo NI 9263 (Figura 3.8) della National Instruments è un modulo di output analogico a 4 canali, a 100 kS/s. Il modulo include anche un canale a doppio isolamento per la sicurezza e l'immunità ai disturbi.



Figura 3.6 - NI 9205



Figura 3.7 - NI 9401



Figura 3.8 - NI 9263

3.6. LABVIEW FPGA

La FPGA è semplicemente un circuito integrato digitale la cui funzionalità sono programmabili via software. Utilizzando l'hardware FPGA integrato in CompactRIO, si possono implementare funzionalità di

temporizzazione, triggering, sincronizzazione, controllo ed elaborazione dei segnali per I/O analogici e digitali personalizzati.

3.7. PROCESSORE REAL-TIME

Il sistema embedded CompactRIO è caratterizzato da un processore industriale Freescale MPC5200 da 400 MHz che esegue in modo deterministico applicazioni realizzate con LabVIEW Real-Time sul sistema operativo real-time VxWorks, soluzione affidabile e diffusa di Wind River. LabVIEW ha funzioni integrate per il trasferimento dei dati tra il chip FPGA ed il processore real-time del sistema embedded CompactRIO.

4. GESTIONE ENERGETICA DI UN HSV

4.1. CONTROLLO DEGLI HSV

I veicoli ibridi solari hanno molte caratteristiche in comune con i più convenzionali veicoli ibridi elettrici (HEV) per i quali sono stati presentati, negli ultimi anni, molti studi sulla loro gestione energetica ottimale e sul controllo dei flussi energetici [15] - [20].

Tuttavia, l'aggiunta dei pannelli solari e l'adozione di una struttura propulsiva di tipo serie suggeriscono l'importanza di eseguire uno studio accurato dei flussi energetici a bordo del veicolo finalizzato alla determinazione delle strategie di controllo ottimali.

In realtà, in molti veicoli ibridi viene adottata una strategia di gestione energetica di tipo "charge sustaining": in pratica viene garantito che alla fine di ogni ciclo di guida lo stato di carica delle batterie risulti invariato rispetto alla condizione di partenza. Nel caso del veicolo ibrido solare, è stata invece implementata una strategia che permette la ricarica del pacco batterie anche nelle fasi di sosta. In questo caso l'obiettivo "charge sustaining" viene garantito lungo l'intero arco della giornata invece che alla fine di un singolo percorso compiuto dal veicolo [21] [22].

Questo tipo di controllo mantiene il livello di carica della batteria (SOC) fra due valori. Quando il SOC scende al di sotto del limite inferiore, viene messo in moto il gruppo moto-generatore (ICE-EG) che si spegne quando il SOC raggiunge il limite superiore.

La configurazione serie consente inoltre un utilizzo intermittente del motore a combustione interna, in particolare a punto fisso ed in condizioni di massima efficienza. In questo caso è quindi possibile privilegiare, nella fase di progettazione del motore endotermico, l'abbattimento delle emissioni e del rumore in corrispondenza del punto di massima efficienza. Quest'ultima opportunità costituisce un indubbio vantaggio rispetto a quanto accade per le vetture tradizionali, dove la massima efficienza di conversione viene sacrificata a vantaggio del raggiungimento di prestazioni ed emissioni accettabili nell'intero dominio di funzionamento. Nel caso di funzionamento intermittente è importante anche tener conto dell'effetto che i transistori termici del motore e del catalizzatore hanno su consumi ed emissioni.

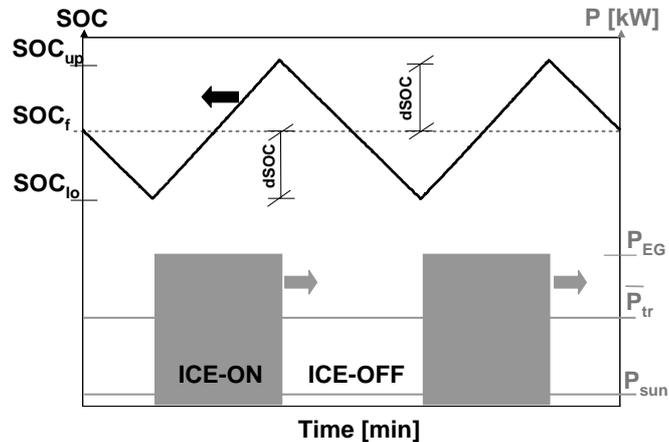


Figura 4.1 - Strategia Charge Sustaining

4.2. APPLICATIVO LABVIEW

A bordo del prototipo di veicolo ibrido solare è stata installata la centralina di controllo della National Instruments: il CompactRIO.

Attraverso una serie di sensori e trasduttori installati a bordo del veicolo si ha la possibilità di realizzare la gestione energetica del veicolo stesso tramite un algoritmo realizzato in LabVIEW.

In ambiente LabView è stato implementato, quindi, l'algoritmo che interagisce con il CompactRIO mediante il protocollo TCP/IP sia per archiviare i segnali provenienti dai vari trasduttori presenti a bordo veicolo che per applicare l'algoritmo di controllo (strategia charge sustaining). I dati archiviati sul notebook, vengono elaborati all'interno dell'algoritmo stesso fornendo informazioni in tempo reale sul ciclo di guida effettuato.

L'applicativo si compone di una serie di funzioni:

a. Funzione Acquisizione: vengono acquisiti i dati relativi ai vari trasduttori installati sul veicolo ibrido. Per fare ciò bisogna comunicare con il CompactRIO, per cui si susseguono tre operazioni:

1. Richiamo della FPGA: cioè esecuzione del firmware precedentemente compilato che permette l'interrogazione dei vari moduli di acquisizione per ottenere i segnali provenienti dai sensori installati;

2. Viene invocato il metodo che consente di comunicare con l'FPGA per acquisire i segnali;

3. Viene rilasciata la FPGA.

b. Funzione Adattamento: vengono eseguite operazioni di taratura sui dati acquisiti.

c. Funzione Archiviazione: dopo un'opportuna formattazione i dati acquisiti vengono salvati su file, per operazioni di Data Mining.

d. Funzione Charge Sustaining: viene applicato l'algoritmo di controllo visto nel paragrafo precedente, questo tipo di controllo mantiene il livello di carica (state of charge SOC) fra due valori limite. Quando questo livello scende al di sotto del limite inferiore, viene messo in moto il sistema ICE/EG (attraverso l'azionamento del relè corrispondente), provvedendo alla ricarica delle batterie. Viceversa quando il livello sale oltre il limite superiore, viene spento l'ICE/EG (attraverso l'azionamento di un secondo relè). Le soglie di accensione/spengimento sono determinate attraverso metodologie di ottimizzazione vincolata finalizzate all'ottenimento del massimo risparmio di combustibile e di una gestione charge-sustaining giornaliera della batteria.

e. Funzione di Sicurezza: attraverso i sensori di temperatura e relè connessi al sistema di areazione è possibile eseguire una logica di sicurezza capace di risolvere i problemi termici (rumore di misura, riscaldamento vano motore etc.).

f. Funzione di Trasmissione su un Server FTP: i dati acquisiti vengono trasmessi su un Server Web in cui è presente uno script capace di rappresentarli graficamente con una frequenza di aggiornamento pari a 1Hz.

g. Funzione di Trasmissione su un Server SMTP: i dati acquisiti vengono trasmessi su un Server di POSTA in cui sarà possibile accedere per eseguire operazioni di Data Mining.

Le funzioni sopra descritte vengono programmate attraverso LabVIEW attraverso la già citata struttura a tre layer:

1. Livello Utente;
2. Livello Real time;
3. Livello FPGA.

Il livello FPGA si occupa della comunicazione tra i moduli e la FPGA del CompactRIO. In particolare consente l'acquisizione delle tensioni dei vari trasduttori connessi al modulo NI 9205, l'attivazione dei relè mediante le uscite digitali del modulo NI 9401 e l'attivazione dei pannelli solari tramite il modulo NI 9263.

Il livello Real Time chiede servizi al livello sottostante cioè alla FPGA, in particolare chiede che gli siano passati i valori delle tensioni dei vari trasduttori connessi al modulo NI 9205. Tali misure vengono prima calibrate e poi memorizzate in un file di testo, ovviamente la frequenza con cui avviene la memorizzazione su file può essere variata, in particolare in un range compreso tra 1Hz e 350Hz.

Al livello Utente vengono create le VI (Virtual Instrument) cioè gli algoritmi che vengono compilati in forma grafica visualizzabile e compilabile solo da LabVIEW. Sono state create, quindi, una serie di VI che fanno parte del progetto principale.

4.3. STRATEGIA RULE-BASED

Una volta creato l'algoritmo necessario alla gestione energetica del prototipo di HSV è stata studiata una metodologia per il controllo di quest'ultimo.

La strategia prende il nome di rule-based di tipo sub-ottimale. La struttura del controllo è la seguente (Figura 4.2):

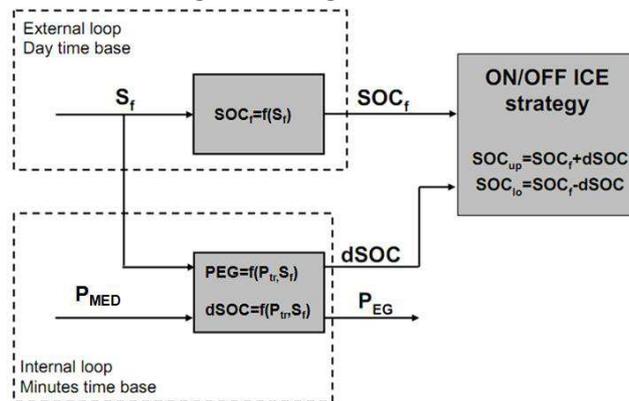


Figura 4.2 - Rule Based strategy

- Un loop esterno definisce il SOC da realizzare al termine del ciclo di guida, a partire dalla stima dell'energia captabile nella successiva fase di parcheggio.
- Un loop interno definisce la potenza del sistema moto-generatore e l'ampiezza della variazione del SOC attorno al valore finale (e quindi le strategie di start-stop del generatore), a partire dalla stima della potenza media richiesta [23].

Si richiede quindi di poter misurare (o stimare) il SOC durante la guida e di poter prevedere la potenza richiesta per un assegnato orizzonte temporale.

L'obiettivo finale della strategia è ottenere una diminuzione dei consumi di combustibile.

4.3.1. DETERMINAZIONE DEL SOC FINALE

In funzione dell'energia solare attesa durante la successiva fase di parcheggio (S_f), si può calcolare lo stato di carica finale al termine del ciclo di guida SOC_f . Se non è possibile prevedere l'istante di fine corsa, il SOC dovrà oscillare attorno a tale valore. Se poi è noto in anticipo il tempo di arresto del veicolo (per esempio perché si usa il navigatore), la strategia di scarica fino a SOC_f si potrà attuare alla fine del percorso, facendo oscillare il SOC attorno al valore ottimale in termini di consumo.

4.3.2. STIMA DELLA POTENZA MEDIA RICHIESTA

La potenza media P_{MED} richiesta al generatore per un orizzonte temporale T è ottenibile a partire dalla potenza di trazione P_{tr} del veicolo, dalla potenza derivante dal solare P_{SUN} e dalla potenza media derivante dalla frenata rigenerativa P_{RB} .

$$P_{MED} = P_T - P_{SUN} - P_{RB} \quad (4-1)$$

La stima della potenza di trazione può essere effettuata (Figura 4.3):

- A priori (backward).
- A posteriori (forward).

Una possibilità è quella di imporre che P_{tr} sia costantemente uguale alla potenza media richiesta alle ruote per cicli di guida comuni, di solito nella gamma da 5 a 10 kW per le autovetture [24].

I risultati migliori sono attesi laddove P_{tr} venga adeguatamente aggiornata durante il percorso di guida.

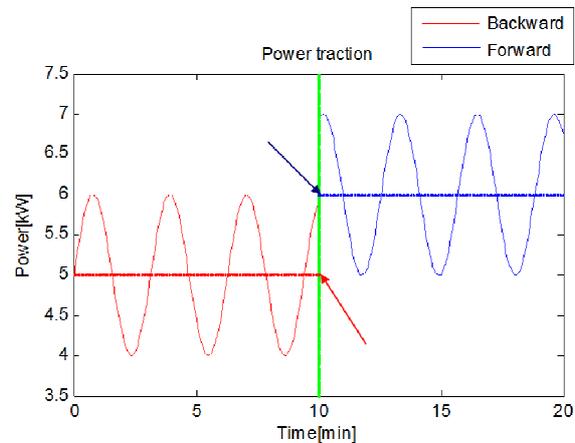


Figura 4.3 - Stima della potenza

Nel metodo basato su conoscenze a priori (backward) la si deduce per mezzo di tecniche di previsione.

Nel metodo basato su conoscenze a posteriori (forward) la si deduce per mezzo di misurazioni disponibili.

La struttura del controllo è, quindi, composta da 3 look-up table:

$$SOC_{FIN} = f(S_f) \quad (4-2)$$

$$d_{SOC} = f(P_{MED}) \quad (4-3)$$

$$P_{EG} = f(P_{MED}) \quad (4-4)$$

In fase di controllo, il moto-generatore viene acceso quando $SOC < SOC_f - d_{SOC}$ e viene spento quando è $SOC > SOC_f + d_{SOC}$. La potenza e l'intervallo di oscillazione variano con la (4-3) e la (4-4) in funzione di P_{MED} (stimato ricorsivamente), mentre anche il SOC_f può variare.

4.4. RULE-BASED SU HSV

Sono stati presentati numerosi lavori al fine di verificare la convenienza nell'adottare la strategia Rule-Based [25] (anche rispetto agli algoritmi genetici [26]).

Avendo dimostrato la sua idoneità per la gestione energetica in real time di HSV, la strategia RB è stata poi implementata sul CompactRIO. I principali ingressi analogici (modulo NI 9205) includono: corrente, tensione, temperatura, velocità, velocità angolare ed irraggiamento solare. L'unica uscita analogica (modulo NI 9263) comanda l'attivazione/disattivazione dei pannelli solari. Le uscite digitali (modulo NI 9401) sono applicate ai relè in grado di effettuare le operazioni di controllo gestite dalla strategia Rule Based.

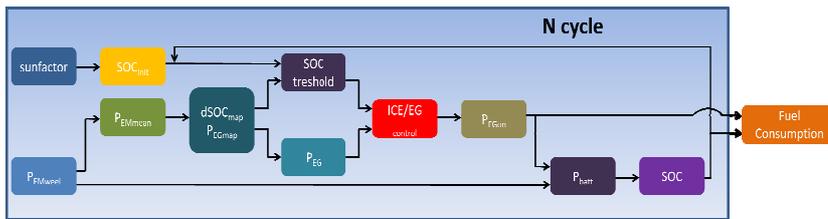


Figura 4.4 - Diagramma di flusso per l'implementazione della RB sul CompactRIO

Gli ingressi principali della strategia RB sono gli stessi visti al paragrafo precedente.

- Sunfactor: S_f equazione (4-2).
- P_{EMweel} : P_{MED} equazioni (4-3) e (4-4).

In Figura 4.4 si può vedere che l'output fondamentale è la fuel consumption.

In questo caso si è scelto di valutare la stima della potenza di trazione a priori. La potenza media richiesta dal motore elettrico (EM) per alimentare le ruote si aggiorna ad ogni intervallo di tempo (impostato dall'utente). Poi, a seconda del valore delle soglie di SOC (SOC_{max} e SOC_{min}) viene gestito il gruppo moto-generatore (ICE-EG). Infine un modello matematico della batteria implementato in LabVIEW effettua il calcolo del valore di SOC per il ciclo successivo. Alla fine del ciclo

guida, e quindi degli n cicli effettuati, un ultimo VI calcola la fuel consumption.

4.4.1. RISULTATI

L'implementazione on-board della strategia RB è stata testata eseguendo sul prototipo di HSV il percorso di guida mostrato in Figura 4.5. Durante il test è stato imposto un orizzonte temporale t . Ad ogni t (pari nel caso in esame a 41,7 secondi) si aggiorna opportunamente la potenza media P_{EM} . In Figura 4.5 sono mostrate anche le seguenti grandezze:

- SOC e le sue soglie.
- Velocità del veicolo ibrido solare.
- Potenza del generatore elettrico.
- Potenza alle ruote: calcolata a partire dalla coppia misurata con un torsionometro.
- Potenza del motore elettrico.
- Potenza media del motore elettrico.

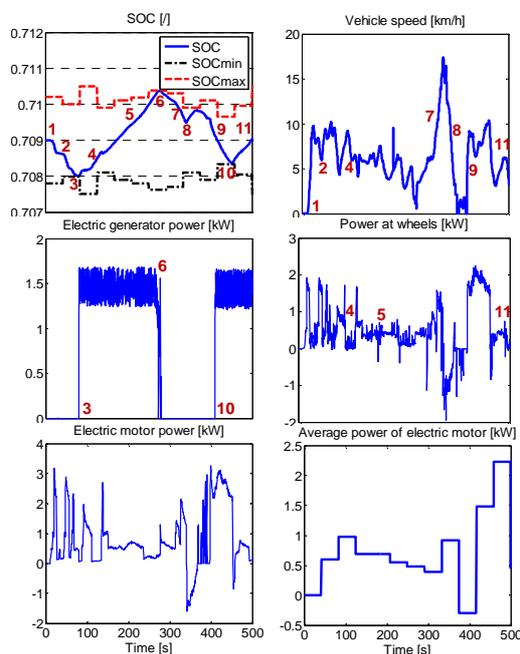


Figura 4.5 - Plot delle principali variabili acquisite durante il test on-board della strategia RB

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

I valori di SOC, velocità, potenza del generatore e la potenza di trazione vengono analizzati con riferimento a ciascuna sezione numerata in Figura 4.5, al fine di illustrare la tecnica di ottimizzazione della strategia RB.

1. In questa sezione la velocità dell'HSV e la potenza di trazione sono pari a zero, quindi non c'è variazione di SOC.

2. Vi è una forte diminuzione del SOC a causa di una rapida accelerazione 0-10 km/h.

3. Il valore del SOC diminuisce fino al valore di SOC_{min} , come imposto dalla strategia RB. Si accende, quindi, il gruppo moto-generatore.

4. Nonostante il gruppo moto-generatore è acceso (ICE on) ci sono due piccole scariche della batteria a causa di due forti accelerazioni.

5. Vi è un aumento lineare di SOC, come conseguenza del valore quasi costante della potenza di trazione.

6. Il valore del SOC aumenta fino al valore di SOC_{max} , come imposto dalla strategia RB. Si spegne, quindi, il gruppo moto-generatore.

7. C'è una rapida diminuzione del SOC a causa di una brusca accelerazione.

8. Qui si vede quella che può sembrare un'anomalia. L'ICE è spento, ma c'è una ricarica breve. Questo succede perché c'è una forte frenata (frenata rigenerativa) come è possibile vedere nel grafico della velocità. Quindi è dimostrato il recupero di energia in frenata

9. Il valore del SOC diminuisce di nuovo con un forte gradiente a causa di forti accelerazioni.

10. Il valore del SOC si riduce fino ad un altro valore di SOC_{min} , anche questo imposto dalla strategia RB.

11. Fino alla fine del ciclo la velocità è bassa e quasi costante, per cui la batteria si carica senza problemi fino a raggiungere il valore iniziale di SOC. In questo modo si garantisce che il funzionamento complessivo avvenga in rispetto della strategia charge sustaining.

Ovviamente la tendenza delle soglie di SOC dipende dall'andamento della potenza media del motore elettrico. Anche questo avviene nel rispetto della strategia RB.

II PARTE

TETTO SOLARE MOBILE PER UN VEICOLO IBRIDO SOLARE

5. ORIENTAMENTO DEI PANNELLI

5.1. GENERALITÀ

Negli Stati Uniti e nelle altre nazioni a media latitudine a nord dell'equatore (per esempio le nazioni europee), il percorso giornaliero del Sole (così come appare) è un arco nel cielo meridionale. Naturalmente è la Terra che si muove. Il punto più alto del Sole sopra l'orizzonte viene raggiunto a mezzogiorno, e l'altezza raggiunta dal Sole dipende dalla stagione (è più alto nel pieno dell'estate, e più basso nel cuore dell'inverno).

Per raccogliere la luce solare, e non per evitarla, i pannelli solari per riscaldare l'acqua o per generare elettricità, sono sempre rivolti verso sud. Inoltre, essi sono invariabilmente inclinati a un angolo di circa 45° , per avere la sicurezza che i raggi solari arrivino più perpendicolarmente possibile. In questo modo il pannello è esposto alla massima concentrazione di luce solare: come si vede dalla Figura 5.1, se il Sole si trova ad un'altezza sull'orizzonte di 45 gradi, un pannello di 0,7 m di larghezza, perpendicolare ai raggi solari, intercetta la stessa quantità di luce di un pannello da 1 m, appoggiato orizzontalmente sul terreno. In tal modo il pannello riscalda l'acqua più rapidamente e raggiunge una temperatura più alta.

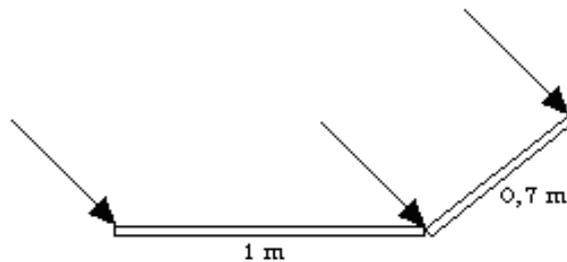


Figura 5.1 - Pannello inclinato a 45°

Il moto apparente del Sole nel cielo può essere importante nella progettazione di un edificio, in particolare nel posizionamento delle finestre, che intrappolano il calore solare. In regioni con un clima caldo e

assolato, come nel Texas, in Arizona, o da noi, nell'Italia meridionale o in Sicilia, è meglio avere le finestre più grandi rivolte verso nord, per evitare il Sole. Le pareti rivolte a sud, viceversa, dovrebbero essere ben isolate termicamente e con finestre piccole, che permettano la ventilazione ma senza far entrare troppo Sole. Al contrario, in regioni come il Canada, devono essere scelte le direzioni opposte, per catturare più calore possibile del pallido sole invernale.

5.2. ENERGIA INCIDENTE

Se si considera un fascio di raggi (si può dire anche un flusso di onde elettromagnetiche) che investe perpendicolarmente una superficie di area S , viene chiamato irraggiamento, o intensità del flusso, la quantità di energia che cade perpendicolarmente sull'unità di superficie nell'unità di tempo (si misura quindi in W/m^2).

L'angolo che i raggi solari formano con una retta perpendicolare o, come si usa dire, normale ad una certa superficie viene definito angolo di incidenza (Figura 5.2).

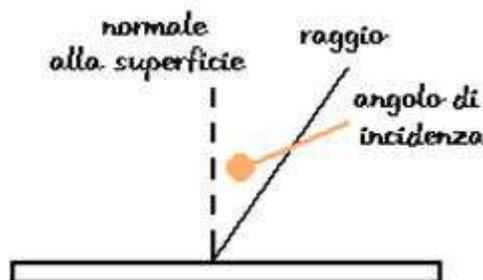


Figura 5.2 - Angolo d'incidenza

La quantità di energia che una superficie assorbe dipende quindi da tale angolo (infatti nei mesi estivi l'energia intercettata è maggiore perché l'inclinazione dei raggi è più vicina alla perpendicolare). Se i raggi non sono perpendicolari alla superficie occorre prendere in considerazione l'area della proiezione della superficie su un piano perpendicolare alla direzione dei raggi. Quest'angolo è uguale all'angolo di inclinazione della superficie rispetto al piano orizzontale (complementari dello stesso angolo) (Figura 5.3).

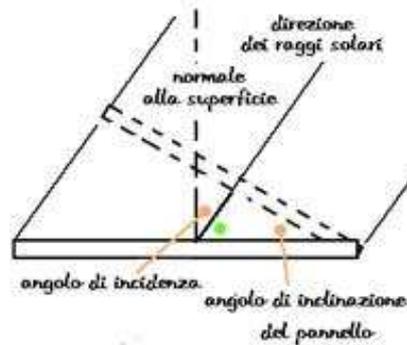


Figura 5.3 - Angolo d'inclinazione del pannello

Per calcolare il flusso di energia attraverso la superficie, è necessario in questo caso moltiplicare la superficie per il coseno dell'angolo tra la direzione dei raggi e la normale alla superficie stessa. A titolo di esempio, per un angolo d'incidenza di 0° la radiazione intercettata è pari al 100%, a 50° scende al 64%, a 75° si porta al 25%.

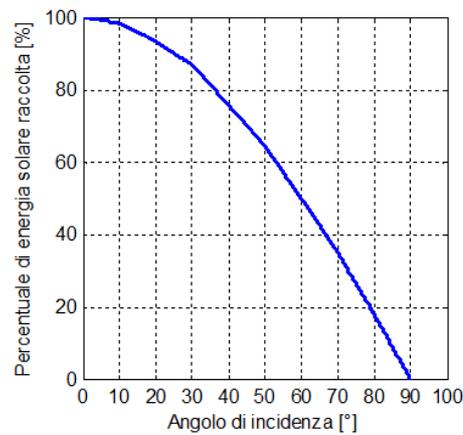


Grafico 5.1 - Energia raccolta in funzione dell'angolo di incidenza

Per esaminare l'inclinazione più conveniente di un collettore solare, può essere utile trovare una relazione che contenga, anziché l'angolo di incidenza, l'angolo tra la direzione dei raggi del sole e la superficie orizzontale della terra (α) e l'angolo di inclinazione del collettore rispetto al piano orizzontale (β).

Con semplici considerazioni geometriche (Figura 5.4) si ha che:

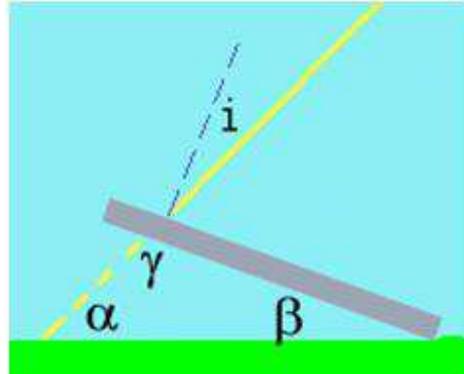


Figura 5.4 - Angoli per l'inclinazione del pannello

$$\gamma = 90^\circ + i \quad (\text{opposti al vertice}) \quad (5-1)$$

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ \quad (\text{angoli interni di un triangolo}) \quad (5-2)$$

$$i = 90^\circ - (\alpha + \beta) \quad (5-3)$$

$$\cos i = \sin(\alpha + \beta) \quad (5-4)$$

Quindi l'energia raccolta dalla superficie inclinata dipende dall'energia incidente secondo la relazione:

$$E_{raccolta} = E_{incidente} \sin(\alpha + \beta) \quad (5-5)$$

Se il pannello è orizzontale, cioè $\beta=0$, si ha la situazione in cui sono forniti i dati della radiazione solare misurati dai centri meteorologici. Ciò significa che da questa informazione possiamo stimare l'energia che effettivamente giunge al suolo:

$$E_{incidente} = \frac{E_{raccolta}}{\sin \alpha} \quad (5-6)$$

Un opportuno orientamento del collettore solare permetterà di raccogliere una quantità di energia superiore a quella misurata su un piano orizzontale.

Nel Grafico 5.2 è riportata una stima dell'energia incidente a Cles (TN) giorno per giorno nel corso di un anno: questa quantità è pari

complessivamente a circa 1630 kWh/m^2 , superiore a quella rilevata da un misuratore posto orizzontalmente pari a 1150 kWh/m^2 . Si tratta di una stima in quanto l'angolo α , considerato giorno per giorno, è l'altezza massima del sole sull'orizzonte (mentre in realtà l'angolo varia anche durante una giornata).

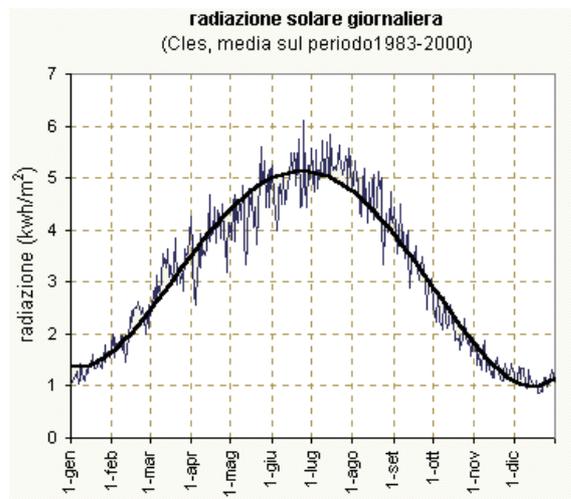


Grafico 5.2 - Radiazione solare incidente

Si può ulteriormente considerare che l'energia che arriva al suolo non è tutta quella che arriva ai margini dell'atmosfera, a causa dell'assorbimento da parte della stessa. La quantità di radiazione diretta dipende molto dalla lunghezza dell'atmosfera che i raggi solari devono attraversare: quanto maggiore è la massa d'aria che essi devono attraversare, tanto maggiore saranno i fenomeni di diffusione ed assorbimento durante il percorso e tanto minore sarà l'energia che raggiungerà il suolo.

Con riferimento alla Figura 5.5, quando il sole è allo zenit (sulla verticale del luogo), si dice che i raggi attraversano una massa d'aria di valore 1 (AM1, air mass 1). Se invece lo spessore è doppio (con un angolo di 60° rispetto alla verticale), si dice che la massa d'aria attraversata è 2, quindi AM2. La situazione immediatamente al di sopra dell'atmosfera terrestre viene convenzionalmente indicata con AM0.

Questo è uno dei fattori che spiegano perché l'energia giornaliera incidente non sia costante durante l'anno; un altro motivo è legato al

diverso numero di ore di sole nelle varie stagioni (da ricordare che i grafici riportano l'energia giornaliera complessiva e non la potenza che giunge al suolo per unità di superficie) [27].

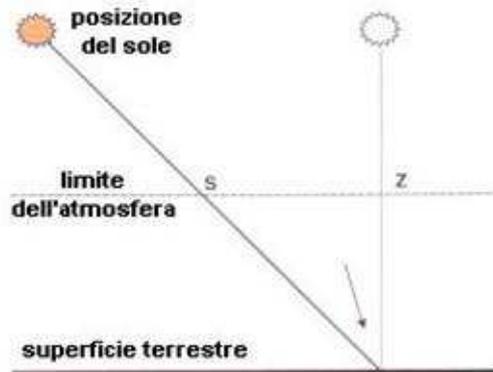


Figura 5.5 - AM: Air Mass number

5.3. INCLINAZIONE DEI PANNELLI

Si definisce inclinazione di un pannello solare l'angolo minore che esso forma con un pavimento orizzontale.

Sono diversi gli aspetti da tenere in considerazione nella determinazione della inclinazione ottimale, non può essere data una singola soluzione generale.

Ogni pannello, di qualsiasi tipo si tratta, sarà più sensibile e avrà un rendimento maggiore quando i raggi solari lo colpiscono in maniera perpendicolare al piano.

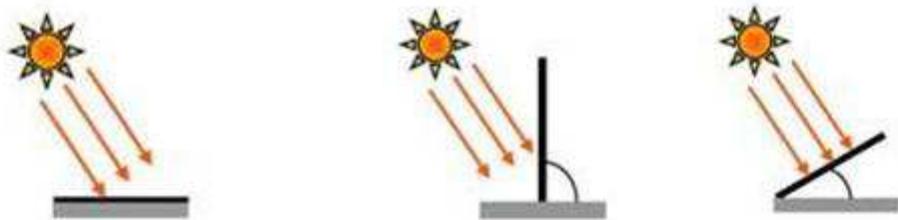


Figura 5.6 - Pannello orizzontale, verticale, orientabile

Questo, perché, secondo la legge di Lambert, l'energia di una radiazione è proporzionale all'angolo incidente, come già detto.

Perciò, quando un pannello sarà posto in posizione orizzontale, sarà molto più sensibile alle radiazioni che provengono in verticale.

Perciò, avrà un rendimento maggiore quando il sole sarà alto nel cielo, come nei periodi estivi, ma avrà un rendimento molto basso in inverno quando la domanda di energia è in genere più alta.

Questa posizione presenta qualche svantaggio per i pannelli solari termici, in quando la notte, siccome vede una più ampia sezione fredda della volta celeste, esso verrà raffreddato più velocemente.

Quando un pannello solare è posto in verticale, si potrà scegliere anche un orientamento del pannello: se posizionarlo che guardi verso sud, est, ovest o nord.

In ogni modo, un pannello posizionato in verticale sarà più sensibile alle radiazioni orizzontali, e perciò avrà un maggiore rendimento in inverno, quando il sole si presenta più basso.

Durante la stagione estiva, invece, avrà un rendimento più basso, nonostante l'apporto di energia da parte del sole sia molto maggiore.

In genere si cerca un equilibrio tra quello che è il piano orizzontale e quello verticale così da cercare di riunire, in una certa misura, i vantaggi delle due possibilità.

La scelta dell'angolo va fatta pensando alle caratteristiche specifiche e alla applicazione del pannello.

Spesso, anche la struttura stessa del luogo, dove il pannello verrà montato, assume un ruolo decisivo durante la scelta dell'angolo e del posizionamento del pannello.

Per le applicazioni di impianti di riscaldamento di piscine, i pannelli sono spesso orizzontali dato che l'impianto solare termico si utilizza pressoché solo durante la bella stagione. L'inclinazione scelta maggiormente alle nostre latitudini per applicazioni generiche si aggira intorno ai $30\div 40^\circ$ a dipendenza delle applicazioni e della tecnologia del pannello.

Questo perché l'inclinazione ottimale per avere il massimo rendimento solare da un pannello durante l'arco di tutto l'anno è di circa $30\div 35^\circ$ [28].

5.4. ORIENTAMENTO PANNELLI

Per orientamento di un pannello solare si intende la direzione verso la quale il pannello “guarda”. Come riferimento a zero gradi è il sud. Se il pannello sarà rivolto più verso ovest si avrà un angolo positivo, se verso est si avrà un angolo negativo.

La scelta di un orientamento per un pannello solare ha senso solo in caso di un pannello inclinato o verticale. Per la scelta del posizionamento e della inclinazione del pannello si può indicare che tanto più la disponibilità di energia solare coincide nel tempo con il fabbisogno di energia, tanto più sarà la resa dell’impianto. Infatti, è vero che esistono degli accumulatori per ovviare al problema tempo di domanda/tempo di offerta di energia, ma se la domanda coincide con l’offerta si possono ottenere dei vantaggi in termini di guadagno energetico.

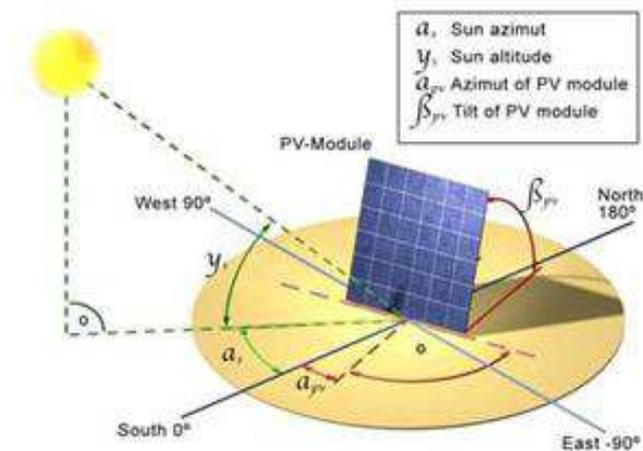


Figura 5.7 - Orientamento di un pannello

Perciò la domanda di energia può influenzare la scelta dell’orientamento ottimale. Se per esempio la domanda di calore nel mattino è più bassa che nel pomeriggio, un orientamento verso il sole pomeridiano a sud-ovest può essere più vantaggioso.

Inoltre bisogna tenere presenti eventuali ostacoli che possono essere presenti: come struttura del terreno nelle vicinanze, montagne, edifici vicini ed altro che può oscurare per parte della giornata il pannello provocandone una forte diminuzione del rendimento. Se ad esempio un

grosso palazzo nelle vicinanze oscura il sole del tardo pomeriggio, può rivelarsi molto profittevole inclinare i pannelli a sud-est.

Se il piano del collettore non è rivolto esattamente a sud, la quantità di energia utile raccolta si riduce, anche se solo leggermente fino ad un angolo di 30° verso est o ovest. Dai 30° in poi l'efficacia di un collettore solare può essere notevolmente ridotta.

La Figura 5.8 indica l'energia media annua per diverse superfici a diverse inclinazioni. Come si può ben vedere la massima energia avviene per un pannello inclinato a circa 30° rivolto a sud.

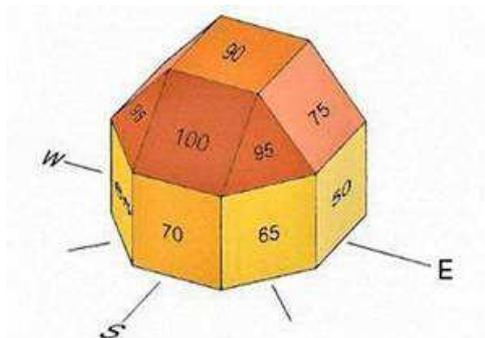


Figura 5.8 - Energia media annua per differenti angolazioni della superficie

5.5. RENDIMENTO

Come accennato, il fatto di variare l'inclinazione e/o l'orientamento dei pannelli conduce ad una maggiore producibilità di energia elettrica.

Orientativamente, un inseguitore monoassiale comporta una maggiore produzione del 10÷20% rispetto ad un impianto fisso, a seconda del tipo di montaggio e di movimento

Un inseguitore biassiale, invece, può permettere un incremento della producibilità del 30÷40% a seconda dei diversi modelli (Grafico 5.3).

Un inseguitore biassiale ha un prezzo maggiore per kWp di un impianto fisso di circa il 20÷25%, quindi anche ipotizzando i casi più sfavorevoli (25% di incremento prezzo, 30% di incremento di produttività) si ha una leva positiva che rende interessante economicamente l'utilizzo degli inseguitori.

In diverse prospettive economico-finanziarie, ipotizzando inseguitori a due assi che montano pannelli ad alta efficienza (21%) si è arrivati a determinare che, a parità di produzione di energia elettrica, con la

soluzione “inseguitori”, viene richiesto il 50% circa della potenza in kWp rispetto ad un impianto fisso, ad un costo complessivo nettamente inferiore [29].

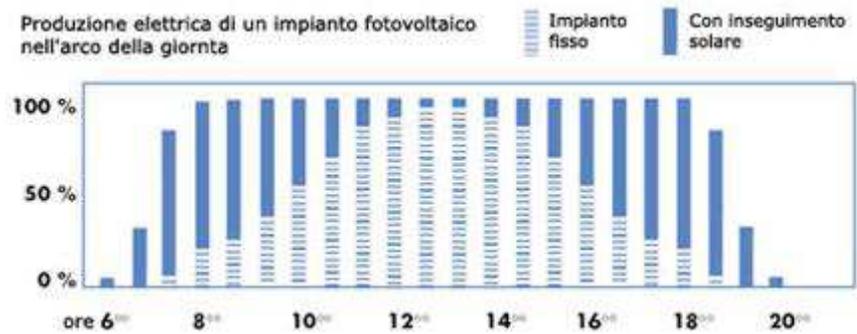


Grafico 5.3 - Confronto tra impianto fisso ed ad inseguimento

5.6. POSIZIONE DEL SOLE

Come si può capire da ciò che si è detto sinora, la determinazione dell'inclinazione dei pannelli dipende dalla posizione del sole.

Per un osservatore che dalla terra osservi il cielo, il percorso del sole sulla volta celeste assume la forma di un arco che vari sia durante il corso dell'anno che con la 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 durata di luce massima è al solstizio d'estate (21 giugno) giorno in cui, alle ore 12, il sole raggiunge il punto più alto nel cielo nel corso di tutto l'anno; il caso opposto si verifica al solstizio d'inverno (21 dicembre) mentre ai due equinozi di primavera (21 marzo) e di autunno (21 settembre) l'altezza del sole alle 12 è intermedia tra la massima e la minima e le durate del giorno e della notte sono esattamente pari a 12 ore in tutto il globo.

La posizione del Sole nel cielo in un certo istante dell'anno in una determinata località può essere individuata grazie a due angoli: l'altezza solare α e l'azimut γ .

Per calcolare questi due angoli è necessaria la conoscenza di altre grandezze [30].

- **Latitudine L:**

è la coordinata geografica pari all'altezza del polo celeste sull'orizzonte. La latitudine è pari all'angolo che la verticale di un punto sulla superficie della Terra (o di un pianeta) forma con il piano equatoriale. Tale angolo viene misurato in gradi sessagesimali e può assumere valori nell'intervallo da 0° a 90° N e da 0 a 90° S. Ovvero si misura da 0° a +90° verso N e da 0 a -90° verso S, fino ai poli (Figura 5.9).

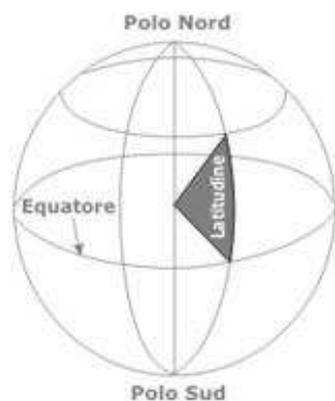


Figura 5.9 - Latitudine di un punto L

- **Longitudine φ :**

rappresenta la misura angolare dell'arco di equatore o parallelo compreso tra il meridiano passante per il punto considerato ed il meridiano di Greenwich. Essa si misura da 0° a +180° verso Est e da 0° a -180° verso Ovest, fino all'antimeridiano di Greenwich.

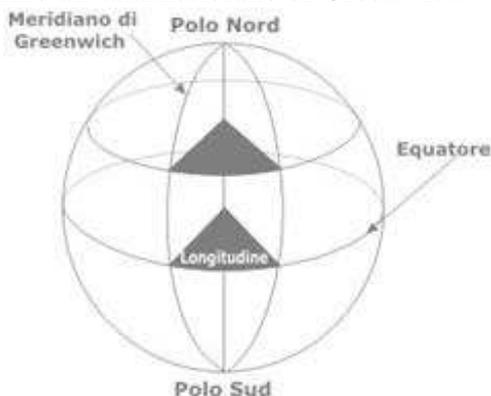


Figura 5.10 - Longitudine di un punto φ

- **Declinazione solare δ :**

è l'angolo che la direzione dei raggi solari forma a mezzogiorno, sul meridiano considerato, col piano equatoriale; risulta anche pari all'angolo che i raggi solari formano a mezzogiorno con la direzione dello zenit sull'equatore e coincide inoltre con la latitudine geografica alla quale in un determinato giorno dell'anno il sole a mezzogiorno sta sullo zenit.

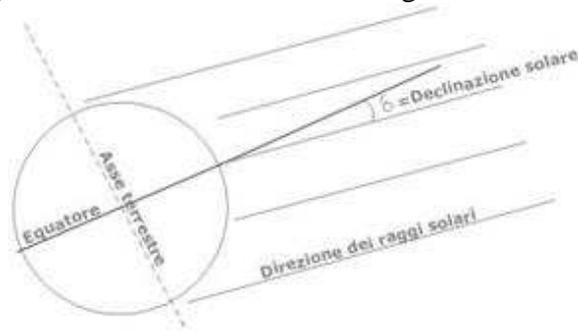


Figura 5.11 - Declinazione solare δ

La declinazione è positiva quando il sole sta al di sopra del piano equatoriale ed è negativa quando il sole è al di sotto di esso. Può essere calcolata per mezzo della formula approssimata di Cooper:

$$\delta = 23.45 \left[360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (5-7)$$

Essendo n l'ennesimo giorno dell'anno.

- **Equazione del tempo E:**

Il tempo indicato dall'ombra di una meridiana solare non coincide con il tempo indicato da un orologio meccanico o elettronico.

Per mezzo di un orologio solare è possibile stabilire il momento del transito del Sole al meridiano.

L'equazione del tempo è la differenza tra il tempo solare vero e il tempo solare medio. È espressa generalmente in minuti e secondi

Tale differenza dipende dal fatto che il tempo solare medio è basato sul movimento di un Sole ipotetico (il Sole medio) che nel corso dell'anno si muove con moto uniforme lungo l'equatore celeste, mentre il moto annuo del Sole vero lungo l'eclittica non è uniforme.

L'equazione del tempo varia con regolarità nel corso dell'anno passando da valori negativi a valori positivi ed è tabulata in tutti gli almanacchi. Essa rappresenta il ritardo (quando ha valori negativi) o l'anticipo (quando ha valori positivi) accumulati nel corso dell'anno tra la posizione del Sole vero e quella del Sole medio. Il Sole vero anticipa o ritarda al massimo di circa 16 minuti il suo passaggio al meridiano rispetto al Sole medio. Quando i due "soli" culminano insieme (sono in congiunzione), l'equazione del tempo si annulla. Ciò accade quattro volte all'anno (il 15 aprile, il 15 giugno, il primo di settembre e il 25 dicembre). Assume, invece, valori assoluti massimi quattro volte l'anno:

- verso il 12 febbraio (-14m,4)
- verso il 15 maggio (+3m,8)
- verso il 27 luglio (-6m,3)
- verso il 3 novembre (+16m,4)

In Figura 5.12 è rappresentata la sfera celeste vista da un osservatore che sta sopra il polo nord. Il cerchio esterno rappresenta l'equatore celeste, P il polo nord celeste, Z lo zenit, Ms il mezzocielo superiore, Sm il Sole medio (lungo l'equatore), Sv il Sole vero (lungo l'eclittica), tm il tempo medio, tv il tempo vero, E l'equazione del tempo [31].

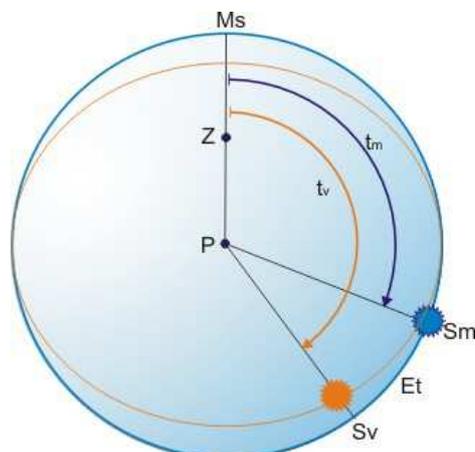


Figura 5.12 - Sfera celeste

La formula per il calcolo dell'equazione del tempo è la seguente:

$$E = -10.1 \sin\left(360 \frac{2d+31}{366}\right) - 6.9 \sin\left(360 \frac{d}{366}\right) \quad (5-8)$$

Dove d è il giorno dell'anno. Se l'equazione viene calcolata per tutto l'anno si ottiene il grafico mostrato in Figura 5.13. In questa figura l'equazione del tempo è mostrata in rosso, le componenti dovute all'eccentricità in blu e quelle dovute all'inclinazione dell'asse terrestre in verde. Valori positivi indicano un errore in anticipo, valori negativi un errore in ritardo.

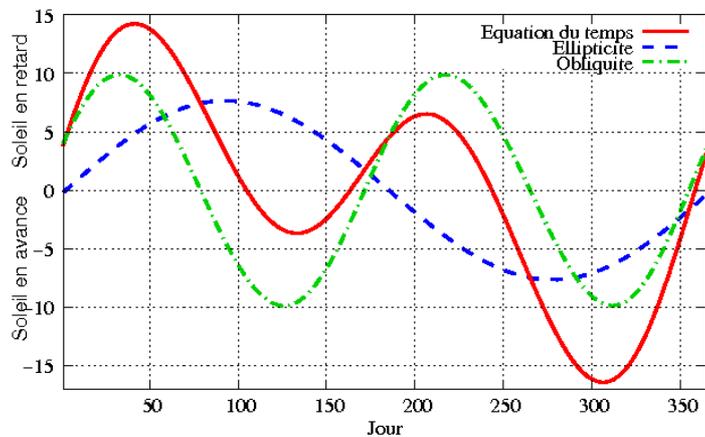


Figura 5.13 - Equazione del tempo

- **Angolo Orario ψ :**

è la distanza angolare tra il sole e la sua posizione a mezzogiorno lungo la sua traiettoria apparente sulla volta celeste; è anche pari all'angolo di cui deve ruotare la terra affinché il sole si porti sopra il meridiano locale.

Risulta nullo a mezzogiorno, positivo nelle ore antimeridiane e negativo nelle ore pomeridiane. Il mezzogiorno è, in generale, l'istante di culminazione del Sole in meridiano, dove per culminazione si intende il passaggio di un corpo celeste attraverso il meridiano locale. Esso risulta pari al numero di ore di distanza dal mezzogiorno moltiplicato per 15 (poiché la Terra ruota di 15 gradi all'ora alla velocità nominale di 360 gradi al giorno).

$$\psi = 15 \cdot h_{sun} - 180 \quad (5-9)$$

Dove h_{sun} rappresenta l'ora solare calcolabile come:

$$h_{sun} = hour + \frac{E - 4(\varphi_{rf} - \varphi_{mr})}{60} \quad (5-10)$$

Dove hour è l'ora del giorno, E è l'equazione del tempo e φ rappresenta la longitudine, rispettivamente, del luogo di riferimento e del luogo di misura.

Con i dati a disposizione è possibile calcolare altezza ed azimut solare.

- **Altezza Solare α :**

è l'angolo formato tra la direzione dei raggi solari ed il piano orizzontale (Figura 5.14).

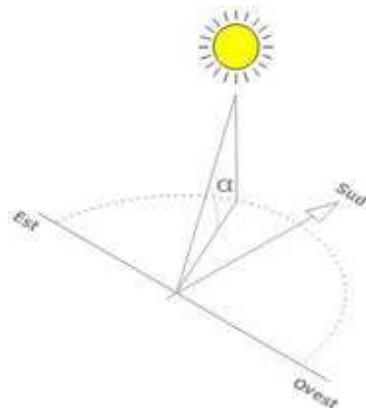


Figura 5.14 - Altezza solare α

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \varphi \sin \delta + \cos \delta \cos \varphi \cos \psi) \quad (5-11)$$

- **Azimut Solare γ**

è l'angolo formato tra la proiezione sul piano orizzontale dei raggi solari e la direzione sud; è positivo se la proiezione cade verso est (prima del mezzogiorno solare) ed è negativo se la proiezione cade verso ovest.

L'azimut solare è pari a:

$$\gamma = \text{sen}^{-1}\left(\frac{\cos \delta \sin \psi}{\cos \alpha}\right) \quad (5-12)$$

nella quale α , come detto, rappresenta l'altezza solare.

C'è da dire che l'azimut solare può assumere valori maggiori di 90° in senso assoluto, mentre la funzione arcoseno per convezione fornisce valori dell'azimut compresi tra -90° e $+90^\circ$.

I valori dell'azimut γ risultano giusti se si verifica questa condizione:

$$\sin \alpha > \frac{\sin \delta}{\sin L} \quad L \geq 0 \quad (5-13)$$

$$\sin \alpha < \frac{\sin \delta}{\sin L} \quad L \leq 0 \quad (5-14)$$

Se questa condizione non viene verificata, il valore corretto dell'azimut solare γ_{corretto} risulta pari a:

$$\gamma_{\text{corretto}} = \text{segno}(\gamma) [180 - |\gamma|] \quad (5-15)$$

Dove γ è il valore dell'azimut calcolato con l'equazione (5-12) segno (γ) è pari al segno di γ positivo o negativo.

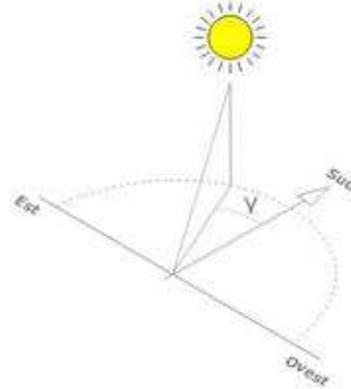


Figura 5.15 - Azimut solare γ

5.7. SIMULATORE PVWATTS

In questo paragrafo si vanno ad esaminare i vantaggi derivanti dall'orientazione dei pannelli.

Un aspetto fondamentale, infatti, del presente lavoro è sicuramente quello di portare alla luce il rapporto che intercorre tra l'energia catturata dal pannello orientato verso il sole e quella catturata quando questo si trova in posizione orizzontale.

Naturalmente questo rapporto dipende da numerosi fattori, ma si pone l'attenzione su due aspetti fondamentali: latitudine e mese dell'anno.

Si è deciso di concentrare l'attenzione su questi due aspetti perché sono quelli richiesti dal motore di calcolo utilizzato [32].

Il motore di calcolo appartiene al centro dati delle risorse rinnovabili (RReDC) degli Stati Uniti e consente l'accesso ad una vasta collezione di dati, programmi e tools, sulle risorse energetiche rinnovabili.

Qui si trovano i dati delle risorse geotermiche, solari, del vento e della biomassa, per le posizioni (latitudine) e stagioni (mesi) dell'anno, in tutti i paesi degli Stati Uniti d'America

Naturalmente si è interessati alle informazioni sulle risorse solari, in quanto queste garantiscono un'ubicazione ottimale del pannello.

L'RReDC offre un calcolatore di prestazioni, PVWATTS, che calcola l'energia elettrica prodotta da un sistema fotovoltaico. Il PVWATTS è stato sviluppato in laboratorio per permettere ai non esperti di ottenere rapidamente le stime di prestazione per i sistemi di pannelli fotovoltaici, all'interno degli Stati Uniti e dei relativi territori.

Con il simulatore l'utente seleziona una posizione sulla mappa degli Stati Uniti (o territori esterni agli Stati Uniti), specifica il formato del sistema dei pannelli FV, i costi elettrici locali, se si tratta di un allineamento fisso o ad inseguimento e gli angoli di inclinazione e di azimut del pannello FV. PVWATTS calcola la produzione di energia mensile ed annuale in kWh/m² ed il risparmio in dollari. L'utente, infine, può anche scegliere di produrre i dati orari di corrente alternata che possono essere conservati in un file di testo.

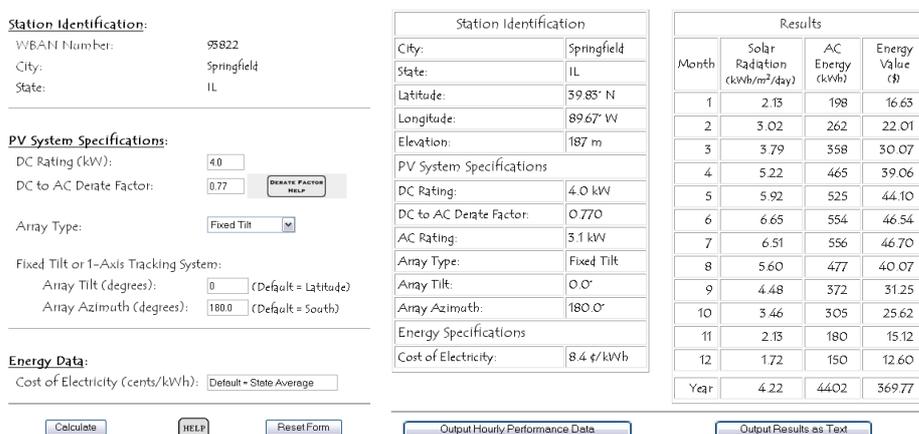


Figura 5.16 - Input ed Output del Simulatore PVWATTS

Il calcolatore è stato utilizzato per i calcoli in diversi stati americani, in particolare in quelli evidenziati in Figura 5.17.



Figura 5.17 - U.S.A.

5.8. RISULTATI SPERIMENTALI - PVWATTS

Per ciascuno Stato sono stati realizzati dei grafici grazie ai risultati ottenuti di volta in volta dal calcolatore.

I dati in input vengono inseriti nella finestra di Figura 5.16.

- **WBAN Number, City e State** vengono inseriti dal calcolatore una volta scelta la città di riferimento.
- **Array Type:** ci permette di decidere se il pannello è fisso (fixed tilt), orientabile su uno (1-Axis tracking) o su due assi (2-Axis tracking). Nei casi esaminati verranno presi in considerazione solo pannello fisso e orientabile su due assi.
- **Array Tilt:** rappresenta l'angolo formato dal pannello rispetto all'orizzontale. Tale angolo è ininfluenza quando ci si trova nel caso di pannello orientabile su due assi. Nel caso di pannello fisso viene fatto variare di volta in volta tra 0° (pannello orizzontale) e 90° (pannello verticale) prendendo i seguenti angoli: 0° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° e infine la latitudine della città.

Tutte le restanti voci sono date da default e non influiscono sul calcolo condotto. Successivamente si procede al calcolo (calculate) che ci fornisce gli output visti in Figura 5.16. Si concentra l'attenzione sulla colonna 2 della tabella Results, con tali risultati e con i dati in input otteniamo delle tabelle che consentono di mettere in evidenza, tramite grafici, i vantaggi ottenibili dall'orientazione dei pannelli .

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

5.8.1. EFFETTI DELLA ORIENTAZIONE DEI PANNELLI

Si vuole adesso dimostrare, attraverso grafici, il perché negli ultimi anni è aumentato l'interesse verso gli inseguitori solari. Infatti i prossimi grafici mettono in evidenza il vantaggio proveniente dall'orientazione lungo i due assi. In prima analisi si è vista l'energia totale solare catturata da un pannello in un anno confrontando quando il pannello è fisso in posizione orizzontale, verticale, e inclinato di un angolo pari alla latitudine e quando invece è orientabile lungo due assi.

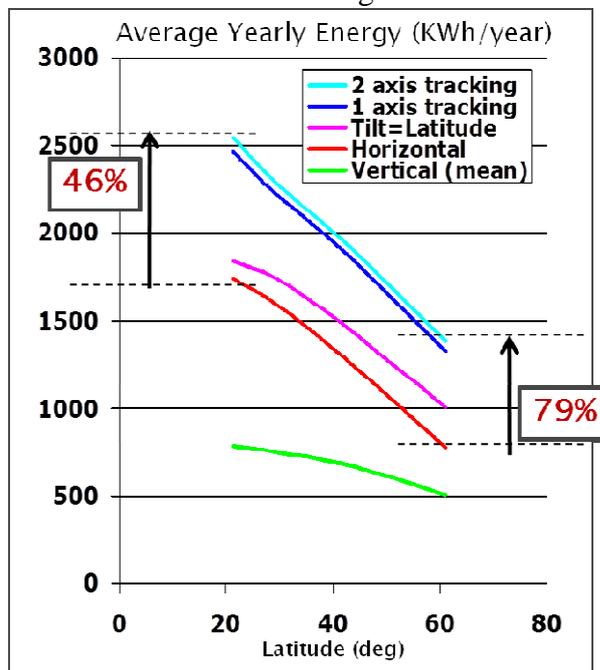


Grafico 5.4 Energia solare in funzione della posizione

Come si vede dal Grafico 5.4 l'energia solare annua catturata da un pannello orientabile lungo due assi è maggiore di quella raccolta da un pannello che assume un'angolazione fissa. Dunque nasce un guadagno dall'orientazione continua del pannello rispetto alla posizione orizzontale del pannello [33] [34].

A parità di latitudine l'adozione di un pannello completamente orientabile permette di guadagnare rispetto ad uno in posizione orizzontale. È interessante notare come un veicolo attrezzato con pannelli

orientabili in Alaska può ottenere più energia di quanto ne otterrebbe un veicolo attrezzato con pannelli fissi alle Hawaii.

Questo conferma che la soluzione proposta non è attuabile solo per paesi con clima tropicale.

6. IL ROBOT INDUSTRIALE

6.1. IL ROBOT INDUSTRIALE

Non è facile dare una definizione soddisfacente di robot. Facendo riferimento all'ambito industriale, tra tutte le definizioni apparse negli anni, si cita quella data dall'IFTToMM (International Federation for the Theory of Machines and Mechanisms) nel 1983 secondo la quale un robot è "una macchina riprogrammabile per svolgere funzioni di manipolazione, movimentazione, lavorazione, in grado di interagire con il suo ambiente circostante e dotata di un certo grado di autonomia".

Le caratteristiche di riprogrammabilità, autonomia e versatilità sono quelle che differenziano il robot dalla macchina automatica la quale è progettata per svolgere un determinato compito e non è facilmente modificabile per effettuare altri lavori. Queste caratteristiche devono essere contemporaneamente presenti [35].

Le principali caratteristiche di un robot dal punto di vista funzionale sono, quindi:

- versatilità;
- possibilità di adattamento a situazioni differenti;
- autonomia, cioè una qualche capacità di prendere decisioni.

6.1.1. ROBOT SERIALI

Un robot seriale è un sistema meccanico composto da un insieme di membri (generalmente rigidi) connessi da accoppiamenti (rotoidali o prismatici) in catena aperta in maniera da ricordare vagamente un braccio umano. Ogni accoppiamento è movimentato da un motore, il primo membro della catena, detto base, è fisso mentre l'ultimo porta un utensile utilizzato per manipolare o lavorare oggetti (pinza, saldatrice, pistola per verniciare, e così via).

L'intero sistema è comandato da un controllore che comprende un calcolatore più l'elettronica di interfacciamento con i motori e i trasduttori.

6.1.2. ROBOT PARALLELI

Una nuova categoria di robot in via di sviluppo è quella dei robot paralleli. Essi sono, almeno per ora, molto meno diffusi di quelli seriali ed hanno caratteristiche complementari rispetto ad essi. I robot paralleli sono costituiti da membri che formano catene cinematiche chiuse, hanno potenzialmente una capacità di carico superiore ai normali robot e sono più rigidi di essi perché la base e l'elemento da movimentare sono collegate da più membri. Spesso però hanno una mobilità più ridotta, cioè il volume dello spazio raggiungibile dall'organo terminale è inferiore rispetto a quello dei robot seriali.

La particolare struttura cinematica dei robot paralleli consente talvolta di posizionare i motori "a terra" alleggerendo la struttura e permettendo di avere velocità e accelerazioni elevatissime anche se, in questo caso, la capacità di carico si riduce molto.

6.1.3. ROBOT IBRIDI SERIALI-PARALLELI

I robot ibridi sono robot dotati di una parte a struttura cinematica parallela e una parte seriale. Spesso si tratta di robot paralleli sui quali viene montata una parte a cinematica seriale.

6.2. STRUTTURA DI UN SISTEMA ROBOTICO

Un robot può essere visto come un sistema meccanico che, opportunamente comandato da un controllore (calcolatore), può interagire con il mondo esterno.

Il robot è comandato da un computer che elabora la strategia di controllo sulla base degli ordini da eseguire e dei dati raccolti da un certo numero di sensori e trasduttori. La strategia di comando, oltre che del modello meccanico del robot e degli attuatori, potrà tenere conto di ciò che succede nello spazio circostante, potendo così far fronte a eventuali imprevisti (ad esempio guasti) o variazioni dell'ambiente che influiscono sul compito richiesto al robot. Nei casi più semplici il robot è sprovvisto di sensori e il computer non è in grado di ricevere informazioni sullo stato del robot e sull'ambiente circostante; in questo caso si dice che il tipo di controllo è ad anello aperto, in contrapposizione al caso più sofisticato detto ad anello chiuso. Il caso più comune è quello in cui il robot è equipaggiato con un sensore di posizione e uno di velocità per ciascun

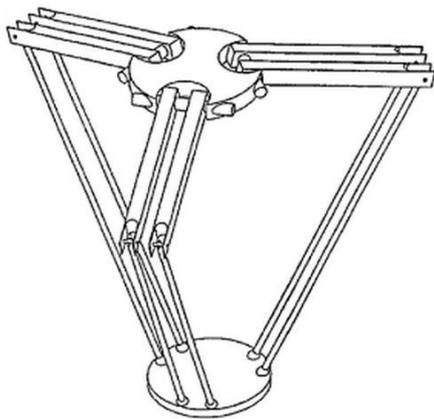
Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

grado di libertà. I casi più sofisticati sono quelli in cui sono previsti anche sensori tattili posti sulla pinza o sistemi di visione.

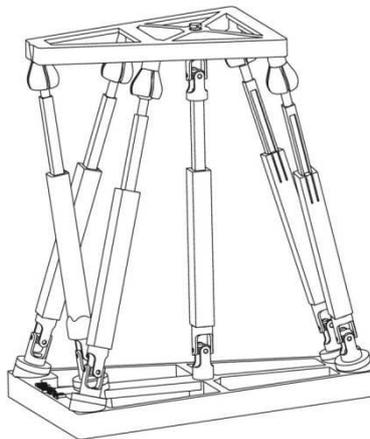
6.3. I ROBOT A CINEMATICA PARALLELA

Una generica PKM (Parallel Kinematic Machine) è normalmente costituita da due piattaforme, dette basi, una delle quali mobile (cui è solidale il dispositivo d'estremità), e l'altra (detta fissa) vincolata a terra e da elementi di collegamento, detti gambe o link.

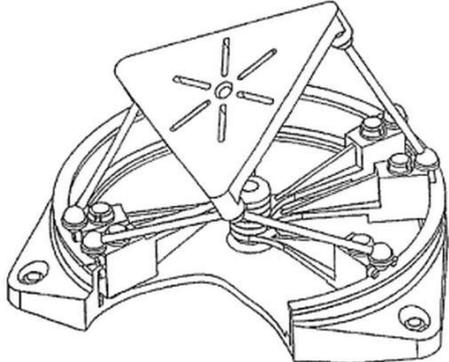
La piattaforma mobile è dotata di n gradi di libertà (GdL), rispetto alla base fissa, che ne permettono il posizionamento e/o l'orientamento nello spazio.



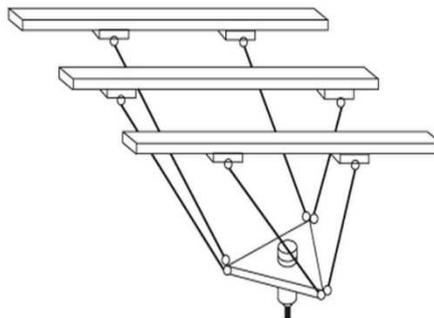
Hexa Robot (Uchiyama 1994)



5-dof Parallel Mechanism



Rotary Exapod by Hexel (Chi 1999)



Hexaglide

Figura 6.1 - Esempi di PKM [36]

Le gambe sono vincolate alle due piattaforme tramite giunti, che garantiscono almeno un movimento relativo. Il tipo e la quantità di movimenti permessi caratterizzano il tipo e il numero di gradi di libertà posseduti dalla macchina. Il movimento della piattaforma mobile è controllato da motori, che azionano i giunti corrispondenti ad alcune di queste articolazioni.

6.3.1. GIUNTI ATTUATI E NON ATTUATI

A differenza dei robot seriali, in cui ogni link è collegato al successivo tramite un giunto ad 1 grado di libertà, azionato da un motore, nelle PKM i giunti che connettono i link alla piattaforma mobile e alla base fissa possiedono uno o più gradi di libertà e possono essere “attuati” (cioè motorizzati) oppure no. I giunti attuati sono detti “attivi”, quelli non attuati sono detti anche “passivi”. Le tipologie di giunti comunemente usati per le PKM sono:

- ad 1 grado di libertà: rotoidale (R) o prismatico (P);
- a 2 gradi di libertà: cardanico o universale (U) costituito da 2 giunti R con asse di rotazione perpendicolare, cilindrico (C) che consente una rotazione e una traslazione lungo lo stesso asse;
- a 3 gradi di libertà: sferico (S), che vincola le tre traslazioni, lasciando libere le rotazioni attorno ai tre assi cartesiani cioè consente rotazioni in qualsiasi direzione attorno a un punto.

In generale, per semplicità progettuale e costruttiva, si preferisce attuare (cioè motorizzare) i giunti a un grado di libertà. Inoltre, per garantire quelle caratteristiche di modularità che costituiscono uno dei vantaggi delle PKM, generalmente viene attuato un unico giunto per gamba. Infine le gambe sono spesso identiche tra di loro.

6.3.2. CLASSIFICAZIONE

Le macchine a cinematica parallela possono essere classificate in base al numero e alla tipologia dei GdL (dof: degrees of freedom) posseduti dall’end-effector, oppure in base al tipo di giunti e di attuazione. In particolare, si possono individuare 3 classi:

- PKM tipo piattaforma di Stewart-Gough con gambe a lunghezza variabile o telescopiche, da 3 a 6 GdL (length variable struct). Il giunto attuato è prismatico; la catena cinematica: UPS o UPU. È una delle tipologie più diffuse, anche se la sua applicazione pratica presenta alcuni svantaggi. Nella sua configurazione classica, infatti, la piattaforma mobile ha una capacità di rotazione limitata.
- Macchine tipo Triaglide con gambe a lunghezza fissa e giunti attuati sulla base (moveable base point). Catena cinematica del tipo PUU o PUS. L'attuazione sulla base consente l'introduzione di motori ad alte prestazioni (motori lineari). Per opportuni dimensionamenti geometrici, si ottiene una struttura di pura traslazione (cioè senza rotazioni). Questo ne rende vantaggiosa l'applicazione a lavorazioni a 3 assi (foratura). Le strutture a 6 GdL risultano più complicate.
- Macchine tipo Delta: con gambe a lunghezza fissa ed estremi di una gamba movimentati su traiettoria circolare. Il robot Delta viene utilizzato per operazioni di pick and place veloce. I tre motori muovono nel piano verticale i tre bracci alle cui estremità si trovano 2 giunti sferici, 6 aste di tipo SS collegano i tre bracci alla piattaforma mobile garantendole tre gradi di libertà. Per opportuni dimensionamenti geometrici le gambe di ogni coppia sono sempre tra loro parallele e la piattaforma mobile trasla nelle tre direzioni XYZ rimanendo parallela a se stessa.

Tutte queste tre tipologie consentono di creare PKM a diversi gradi di libertà in funzione del numero e della disposizione degli attuatori, delle gambe e dei vincoli. Ad esempio se la prima struttura è realizzata con solo tre gambe ed in luogo dei giunti sferici si impiegano dei giunti cardanici si può ottenere una PKM di sola traslazione; analogamente se nelle altre due strutture si impiegano sei moventi che posizionano le estremità delle gambe si ottengono PKM a sei gradi di libertà.

Inoltre, si parla spesso di macchine fully-parallel se l'end-effector o punta utensile è posizionato e/o orientato esclusivamente da una struttura parallela o di macchine ibride in cui una parte del moto è conferita all'end-effector da una struttura seriale a due o tre GdL.

6.3.3. GRADI DI LIBERTÀ

Il numero dei GdL, N_g , di un manipolatore parallelo può essere calcolato facilmente utilizzando la formula di Grübler (equazione (6-1)), valida però solo per meccanismi con giunti binari (cioè giunti che collegano tra loro 2 soli corpi rigidi):

$$N_g = \lambda(l - j - 1) + \sum_{i=1}^j g_i \quad (6-1)$$

con:

- λ : fattore di mobilità, nel caso piano vale 3 e in quello spaziale vale 6;
- l : numero di corpi rigidi (inclusa la base fissa);
- j : numero di giunti;
- g_i : gradi di libertà concessi dal giunto i -esimo (1 per giunti R o P, 2 per U o C, 3 per S).

6.3.4. VOLUME DI LAVORO

Nel caso delle PKM il volume di lavoro è generalmente definito come l'insieme di punti raggiungibili del TCP (Tool Center Point, "centro utensile"). Esso può essere suddiviso in tre zone:

- Reachable Workspace (RW): insieme connesso di punti nello spazio che possono essere raggiunti dal TCP con almeno 1 orientamento della piattaforma mobile;
- Simplified Workspace (SW): insieme connesso di punti nello spazio che possono essere raggiunti dal TCP fissato l'orientamento della piattaforma mobile. È contenuto nel RW;
- Usable Workspace (UW): insieme connesso di punti nello spazio raggiungibili dal TCP con un dato range di orientamento della piattaforma mobile e che soddisfino dati criteri di velocità, accelerazione, rigidità, all'end-effector. È contenuto nel SW ed è quello effettivamente utilizzabile in predefinite condizioni di lavoro [35].

7. PROGETTAZIONE DI UN TETTO SOLARE MOBILE

7.1. PERCHÉ ORIENTARE

Lo scopo di creare un tetto solare mobile per un veicolo ibrido solare, dunque di non lasciare fissa la posizione dei pannelli, è che se si vuole sfruttare al massimo l'energia proveniente dal sole, i pannelli devono disporsi perpendicolarmente ai raggi solari. Come si è visto nei capitoli precedenti la produzione di energia elettrica di un impianto fotovoltaico è molto maggiore con dispositivi di inseguimento solare rispetto a quella che si avrebbe se i pannelli fossero fissi.

Naturalmente a causa di problemi di natura geometrica (eventuali interferenze del tetto mobile con il tetto del veicolo) non è sempre possibile orientare il tetto ortogonalmente ai raggi solari.

La realizzazione del tetto è stata preceduta da una fase di progettazione e da una sperimentale.

In una prima fase il tetto è stato progettato con l'ausilio di nozioni di cinematica e grazie a software quali Matlab [33] e SolidWorks [34] per comprendere quali angolazioni il tetto può raggiungere per disporsi quanto più ortogonale possibile ai raggi solari.

Infine a livello sperimentale si è passati alla realizzazione fisica in scala del tetto.

7.2. QUANDO ORIENTARE

Il tetto potrebbe orientarsi continuamente anche durante la fase di guida. Questo però creerebbe non pochi disagi.

Innanzitutto il tetto sarebbe costretto a cambiare orientamento ad ogni curva con inevitabili perdite aerodinamiche e con ripercussioni sulla stabilità del veicolo dovute ad esempio al vento.

Inoltre durante la guida, inevitabilmente, i pannelli, a causa del mismatching (ombre, nuvole, sporcizia, difetti costruttivi dei pannelli) hanno una potenza inferiore alla massima ottenibile (Figura 7.1), quindi, l'incremento di potenza, orientando i pannelli, risulterebbe trascurabile.

Infine non bisogna dimenticare che il tetto per il suo movimento richiede energia che verrà sottratta all'energia che il sole fornisce durante la guida.

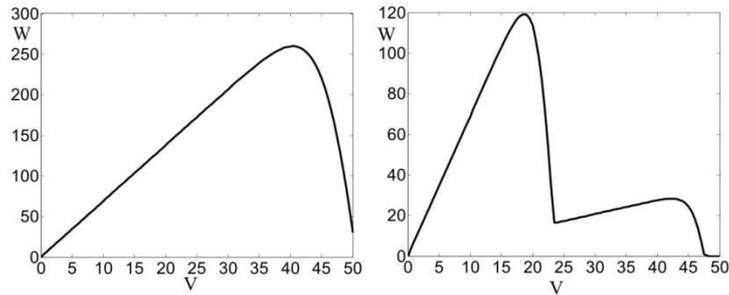


Figura 7.1 - Condizioni di lavoro uniformi e in presenza di mismatching

Tutto ciò mette in evidenza che è più conveniente orientare il tetto solo quando il veicolo è fermo per un certo tempo. Naturalmente ciò implica che questo si andrà ad orientare dopo qualche minuto che il veicolo sia stato parcheggiato.

Si considera, quindi, il seguente bilancio di energia in un veicolo solare (eq. (7-1)):

$$E_{sun} = E_p + E_d = h_p A_{PV} e_{sun} \frac{h_{sun} - h_d}{h_{sun}} a + h_p A_{PV} e_{sun} \frac{h_d}{h_{sun}} b \quad (7-1)$$

Dove:

- E_{sun} : netto energia solare [kWh/giorno];
- E_p : energia solare disponibile in fase di parcheggio [kWh/giorno];
- E_d : energia solare disponibile in fase di guida [kWh/giorno];
- η_p : efficienza pannello;
- α : fattore di riduzione dovuto al processo di carica/scarica della batteria (=0.9);
- β : fattore di soleggiamento durante la guida dovuto alla presenza di mismatching (=0.9);
- A_{PV} : superficie totale dei pannelli (m^2);
- e_{sun} : soleggiamento medio [kWh/ m^2 giorno];
- h_{sun} : ore di soleggiamento;

- h_d : ore di guida.

Si consideri che $\frac{h_{sun} - h_d}{h_{sun}}$ è la frazione di ore giornaliere spese durante il parcheggio e che $\frac{h_d}{h_{sun}}$ è la frazione di ore di guida giornaliere, se la frazione durante il parcheggio è maggiore di quella durante la guida, a parità di parametri che influenzano E_p ed E_d , vuol dire che E_{sun} è influenzato maggiormente dalla frazione di energia accumulata durante il parcheggio.

Come già ricordato nei capitoli precedenti, recenti statistiche condotte dal governo del Regno Unito [12] dicono che:

- il 71% delle persone utilizza ogni giorno l'auto per raggiungere il posto di lavoro;
- il 46% di queste impiega meno di 20 minuti per andare da casa al lavoro;
- molto spesso su ciascuna auto vi è un solo passeggero.

Spesso, quindi, l'auto, come si evince da questa statistica, viene utilizzata nella fase di guida per meno di un'ora al giorno e la maggior parte del tempo rimane parcheggiata. In queste condizioni avremo che la frazione di ore giornaliere spese durante il giorno è maggiore delle ore di guida. Conviene dunque concentrare la nostra attenzione sul veicolo fermo in fase di parcheggio.

Un'ulteriore conferma di ciò si ha osservando la Figura 7.2, che ci informa che a parità di potenza richiesta dall'auto, ad esempio 5kW, il contributo di energia solare se si usa la macchina per un'ora è del 60%, se la si usa per due ore è del 30%.

Infatti il contributo in termini di energia solare, a parità di potenza, diminuisce all'aumentare delle ore di utilizzo del veicolo.

Un veicolo che cammina in maniera continua, per esempio 10 ore al giorno riceve un contributo del 100% di energia solare solo per potenze bassissime, dell'ordine di 1 kW.

Dunque si può concludere che per un uso intermittente dell'auto e potenze limitate il contributo di energia solare è significativo: per un uso

dell'auto compreso tra 1-2 ore al giorno e potenze di 5÷10 kW il contributo di energia solare è compreso tra il 18% e il 60%.

In virtù delle considerazioni appena fatte si capisce perché questo studio si concentra sulla fase di parcheggio dove si realizza la movimentazione del tetto.

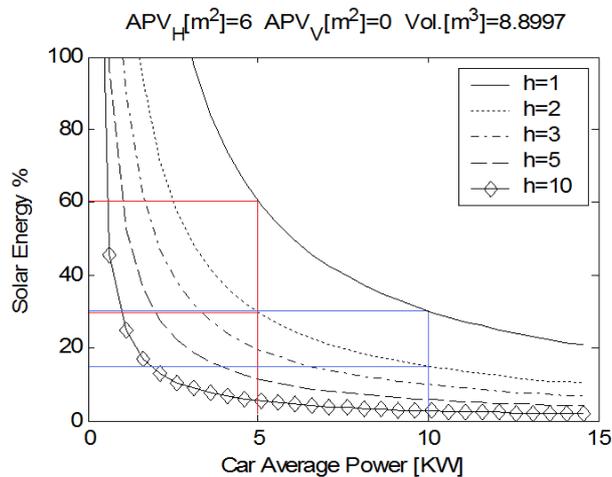


Figura 7.2 - Potenza Richiesta ed Energia Solare fornita

7.3. COME ORIENTARE

Il tetto solare mobile è stato realizzato come un robot parallelo a tre gradi di libertà.

7.3.1. PROGETTAZIONE 3D

Innanzitutto è stato realizzato un modello cad 3D con l'ausilio di SolidWorks®.

SolidWorks® è un software di disegno e progettazione tridimensionale parametrica, prodotto e commercializzato dalla Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. SolidWorks® nasce come software appositamente dedicato all'ingegneria meccanica ed è quindi particolarmente utile per la progettazione di apparati meccanici, anche complessi [37].

In Figura 7.3 è rappresentato il primo modello 3D del tetto mobile.

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

Il modello è composto da una base fissa ed una mobile collegate tra loro da una serie di elementi di collegamento (come da definizione di PKM).

I componenti essenziali sono:

- a Base mobile;
- b Base fissa;
- c Asta;
- d Snodo sferico;
- e Cerniera;
- f Guida;
- g Slitta.

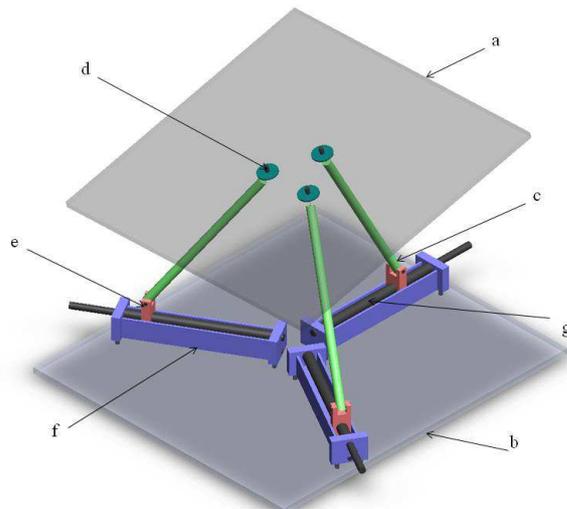


Figura 7.3 - Prototipo di tetto solare mobile

Sulla base fissa sono posizionate le tre slitte con le guide (vite senza fine) messe in rotazione da tre motori alle estremità. Le tre guide avanzando fanno ruotare le aste, essendo collegate tra loro da una cerniera. Le aste impongono l'angolazione alla base mobile per mezzo di tre snodi sferici montati sotto quest'ultima.

7.3.2. GRADI DI LIBERTÀ

Il numero dei GdL, N_g , di un manipolatore parallelo può essere calcolato facilmente utilizzando la formula di Grübler (equazione (6-1)).

Nel caso in esame si ha che:

- λ : fattore di mobilità. Dato che il modello si muove nello spazio: $\lambda=6$;
- l : numero di corpi rigidi. Nel caso in esame $l = 8$: base fissa, base mobile, le tre slitte e le tre aste;
- j : numero di giunti. I giunti sono 9, ossia tre coppie prismatiche tra telaio (comprendente la base fissa e le tre slitte) e le tre guide, tre coppie rotoidali tra le tre guide e le tre aste, ed infine tre coppie sferiche tra le tre aste e il tetto mobile;
- g_i : gradi di libertà concessi dal giunto i -esimo (1 per giunti R o P, 2 per U o C, 3 per S). Esistono nel modello 6 giunti tra rotoidali e prismatici e tre giunti sferici.

$$N_g = \lambda(l - j - 1) + \sum_{i=1}^j g_i = 6(8 - 9 - 1) + (3 \cdot 1 + 3 \cdot 1 + 3 \cdot 3) = 3 \quad (7-2)$$

Dunque il modello da realizzare ha, come detto in precedenza, 3 gdl, dunque occorrerà comandare tre spostamenti.

Come detto nel capitolo dedicato ai robot paralleli, per semplicità progettuale e costruttiva, si preferisce attuare (cioè motorizzare) i giunti a un grado di libertà. Inoltre, per garantire quelle caratteristiche di modularità che costituiscono uno dei vantaggi delle PKM, generalmente viene attuato un unico giunto per gamba. Si è deciso quindi di comandare le tre guide tramite motori ad esse connessi.

7.3.3. VALIDAZIONE MODELLO MATEMATICO

Prima di passare alla realizzazione fisica, il modello è stato validato da un punto di vista matematico con MATLAB[®] [33].

MATLAB (abbreviazione di Matrix Laboratory) è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica che comprende anche l'omonimo linguaggio di programmazione creato dalla MathWorks. MATLAB consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, e interfacciarsi con altri programmi.

MATLAB è usato da milioni di persone nell'industria e nelle università per via dei suoi numerosi tool a supporto dei più disparati campi di studio applicati e funziona su diversi sistemi operativi, tra cui Windows, Mac OS, GNU/Linux e Unix [38].

La creazione di un modello matematico del tetto mobile è stata realizzata con il programma MATLAB. La rappresentazione di tale tetto è stata possibile perché la grafica è parte fondamentale in MATLAB per rappresentare i dati.

Per quanto riguarda la programmazione in Matlab, la simulazione del moto del tetto è stata possibile attraverso la compilazione di un main program con due function.

Il main program si interfaccia con un documento Excel dal quale acquisisce e nel quale scrive alcuni dati che Matlab fornisce come output, ed al qui interno verranno utilizzate le due function.

Nella Figura 7.4 vi è una proiezione sul piano x-y del triangolo che unisce gli snodi e del triangolo che unisce i punti di inizio corsa delle slitte.

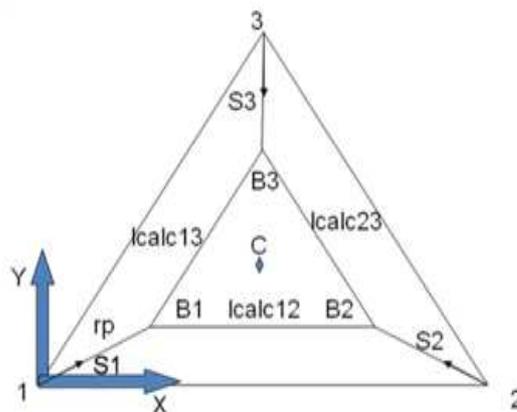


Figura 7.4 - Schema del tetto mobile

Le coordinate dei punti 1, 2 e 3 corrispondono ai punti di inizio corsa della slitta; con $r_1=r_2=r_3=r$ viene indicata la lunghezza braccio [mm] (cioè delle aste) e con l la distanza tra gli snodi sotto il tetto [mm]. Con x_c , y_c e z_c vengono indicate le coordinate del baricentro del triangolo degli snodi e del tetto mobile.

Con α vengono indicati gli angoli che forma l'asta con l'orizzontale; con s le corse compiute dalla slitta che corre su vite senza fine, con B vengono indicati i punti dove sono collegati gli snodi sotto il tetto e vengono rappresentati in proiezione indicate nella Figura 7.4. Il pedice S viene assegnato alle coordinate dei punti in cui si trovano le slitte, mentre col pedice D vengono indicati i punti estremi del tetto mobile.

All'inizio del programma principale si richiama il file Excel, qui sono scritti i dati fissi che vengono inviati al programma: lunghezza dell'asta (r), la distanza tra gli snodi (l), le dimensioni del tetto, larghezza e lunghezza e l'angolo iniziale delle aste quando si ha la condizioni di riposo.

In output l'algoritmo ci fornisce una serie di informazioni: presenza di eventuali interferenze, i tre valori delle corse s , i tre valori degli angoli α , le quote dei quattro punti D che definiscono univocamente la posizione del tetto mobile Figura 7.5, i valori ottimizzati degli angoli formati dal tetto mobile rispetto a x e a y , ed i valori di l e r .

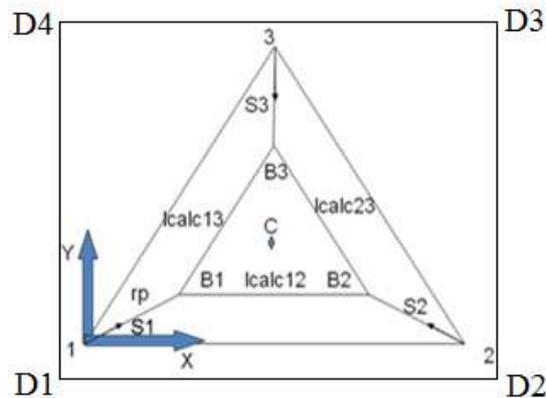


Figura 7.5 - Posizione del tetto mobile

Infine, con l'ausilio di un plot 3D, viene rappresentata la dinamica del tetto mobile. Il rettangolo di colore ciano rappresenta la posizione del tetto mobile nello spazio; le linee verdi stanno a indicare le corse s compiute dalle guide; le linee nere rappresentano i bracci (cioè le aste) e

la loro inclinazione; il triangolo rosso indica il triangolo formato dai punti di attacco degli snodi (Figura 7.6).

Dunque attraverso il programma Matlab è stato possibile ottimizzare la lunghezza delle aste e la distanza degli snodi; ed attraverso il plot3D si è potuto osservare il tetto nelle diverse configurazioni e i vari angoli rispetto a x, y, z ottenuti dal tetto in dipendenza dalle corse delle slitte, ricavando in tal modo le massime inclinazioni raggiungibili dal tetto.

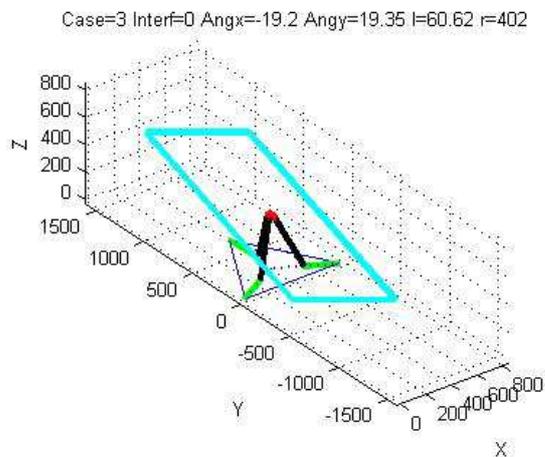


Figura 7.6 - Rappresentazione in Matlab del tetto mobile

La validazione matematica del modello presentato è stata portata avanti anche con l’ausilio di un tool di MATLAB/Simulink il SimMechanics.

. Il software SimMechanics è un ambiente modellato attraverso diagrammi a blocchi per il progetto ingegneristico e la simulazione di macchine costituite da corpi rigidi, per studiarne i movimenti, usando configurazioni standard newtoniane di forze e momenti.

Col software SimMechanics è possibile modellare e simulare sistemi meccanici con un complesso di tool per configurare i corpi e le loro proprietà di massa, i loro possibili moti, i vincoli cinematici, e i sistemi di coordinate, e per trasmettere e misurare i moti dei corpi.

Il sistema meccanico è rappresentato da un diagramma di blocchi tra loro collegati, secondo una modalità simile a quella per costruire i modelli in Simulink .

SimMechanics permette di sfruttare contemporaneamente anche le potenzialità della libreria di Simulink; ad esempio per inserire particolari segnali negli attuatori, Simulink offre molti blocchi utili a definire qualsiasi tipo di andamento; per quanto riguarda i sensori offre un'ampia gamma di blocchi atti a garantire la visualizzazione grafica dei parametri che si desidera misurare.

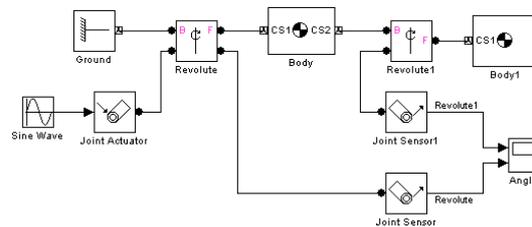


Figura 7.7 - Interfaccia SimMechanics

E' inoltre possibile parametrizzare il nostro sistema, ottenendo così anche un indispensabile collegamento con la shell di Matlab, ovvero la Command Window, all'interno della quale è necessario inserire i particolari valori da voler assegnare ai vari parametri.

Costituito il nostro sistema è possibile azionare la simulazione, con la possibilità di avere anche una resa grafica (Figura 7.8). Durante la simulazione, il software risolve le equazioni del moto e applica le soluzioni al sistema mostrandone il movimento.

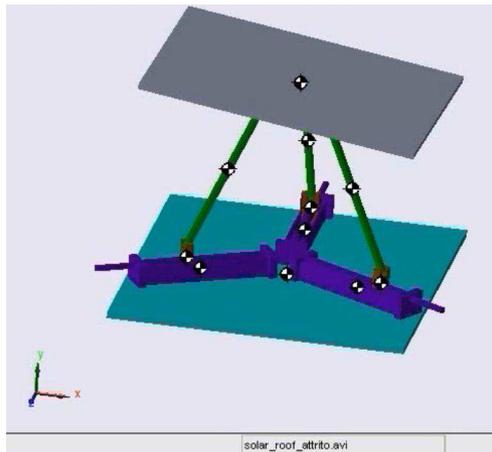


Figura 7.8 - Animazione del tetto mobile in SimMechanics

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

La simulazione grafica viene eseguita in una particolare finestra, all'interno della quale si possono far comparire le terne dei sistemi di coordinate che definisco i corpi, i loro centri di massa.

È possibile regolare la visuale di simulazione e tenere sott'occhio il clock di simulazione. Quest'ultimo dipende dalla complessità del modello, dal passo di integrazione, dall'ordine di grandezza dei valori inseriti. Per quanto riguarda il metodo d'integrazione numerica delle equazioni differenziali, come default, è inserita la funzione ode 45. È inoltre possibile variare il range di tempo all'interno del quale si svolge la simulazione ed anche definire il passo di implementazione del tempo, ad esempio posso definire come passo $1e^{-3}$, che corrisponde al calcolo di mille punti in un secondo. Il caso default presenta un passo auto, ovvero passo automatico, che viene stabilito dal software.

Un modello in SimMechanics può essere costruito al suo interno, oppure può essere anche importato all'interno del programma stesso. In quest'ultimo caso si effettua una traduzione del modello, realizzato in un altro software, nel formato adatto all'importazione in Matlab, cioè formato XML. L'XML (eXtensible Markup Language) indica un linguaggio marcatore (Markup Language) estensibile (eXtensible) in quanto permette di creare tag personalizzati. Effettuata l'operazione di conversione dalla Command Window. Tramite uno specifico comando è possibile richiamare il modello XML in SimMechanics rendendolo un file "mdl". Il comando per SimMechanics è `mech_import('nome_file')`.

In questo caso SimMechanics, oltre a realizzare il modello caricato da un altro software, ad esempio da una piattaforma CAD 3D, nel nostro caso SolidWorks, permette di aggiornarlo caricando il sistema gradualmente così da inserire tutte le modifiche necessarie da effettuare, quali quelle per inserire le dissipazioni nel nostro sistema o/e sensori, attuatori. Anziché mettere in difficoltà il progettista nel modificare il modello totale con una difficoltà più o meno grande (in base alla complessità del modello), il tool lo agevola permettendo le modifiche volta per volta. Poiché i sistemi CAD non permettono di garantire ai corpi determinate masse, SimMechanics consente anche quest'ulteriore modifica, consentendo di agire sul tensore d'inerzia.

Il modello CAD 3D precedentemente presentato è stato convertito in XML, successivamente in file mdl (Figura 7.9) e su questo sono state

eseguite una serie di valutazioni matematiche che non potevano essere effettuate in un ambiente CAD .

Nel caso in esame SimMechanics è stato utilizzato per simulare il comportamento del tetto mobile sottoposto ad attrito, in particolare ci si è soffermati sul calcolo delle dissipazioni per attrito, inserendo all'interno dello schema, i blocchi di Simulink e SimMechanics che consentono la simulazione dell'attrito.

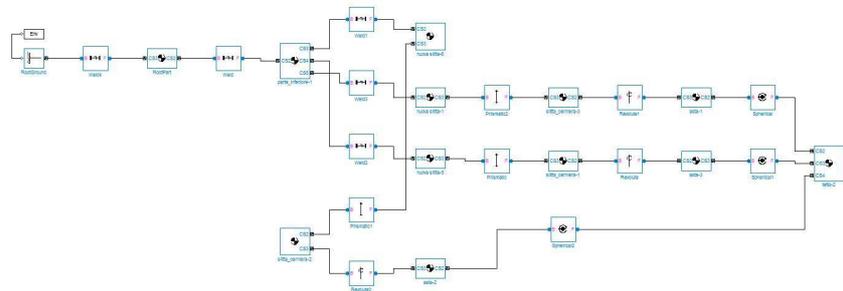


Figura 7.9 - Tetto Solare Mobile in SimMechanics

Per valutare gli effetti dell'attrito, sono state scelte due configurazioni che hanno lo stesso stato iniziale e lo stesso stato finale, con uguali condizioni al contorno, in termini di potenze motrici applicate. Sono stati infatti usati tre attuatori, ciascuno applicato a uno slider, di determinate potenze. Una configurazione prevede l'attrito al suo interno, un'altra è senza attrito.

Si è valutato l'influenza dell'attrito:

- a parità di corse iniziali degli slider;
- a parità di potenze applicate agli slider;
- a parità di configurazione finale (corse finali degli slider) del tetto solare mobile.

Se si concentra l'analisi energetica sulle corse, le configurazioni finali coincidono in termini energetici, perché abbiamo tre traslazioni che sono sì diverse, ma con posizioni finali uguali ed il contenuto energetico è speso soltanto per la traslazione.

La simulazione è stata definita in modo da interrompersi all'istante in cui viene raggiunta la configurazione finale, comune ai due casi.

Per quanto riguarda le potenze applicate, ci sono due potenze, applicate nei due casi, da 1 e 2 W.

Nella configurazione iniziale le tre le corse delle slitte sono nulle. La configurazione finale delle corse è di 5 cm per gli slider soggetti alla stessa potenza e 9,2 cm per quello soggetto alla potenza doppia.

Per quanto riguarda il modello privo di attrito l'istante t , in cui viene raggiunta la configurazione delle corse appena definita, è pari a 0,264079 s. Nel caso con attrito la simulazione termina a $t=0,300634$ s. Si comprende quindi che per raggiungere la stessa inclinazione del pannello, ovvero la stessa configurazione di corse, occorre più tempo nel modello reale rispetto a quello ideale, in cui non si ha alcuna dissipazione di energia. Si deduce anche che la forza nel tempo, necessaria al raggiungimento delle posizioni finali degli slider, è maggiore nel caso con attrito, sottintendendo ovviamente l'uguaglianza delle potenze applicate in entrambi i casi. Come è intuibile, è risultato che il lavoro meccanico nel caso con attrito è maggiore del caso senza attrito e che l'istante in cui viene raggiunta la configurazione finale nel modello con attrito è maggiore di quello nel modello ideale. Di seguito è riportato il grafico (Figura 7.10) in cui è rappresentato l'andamento del lavoro meccanico nel tempo in presenza e in assenza di attrito. È visibile con lo scorrere del tempo la differenziazione tra i due casi, il lavoro meccanico in presenza di attrito cresce col tempo e col tempo cresce anche la differenza tra i due lavori.

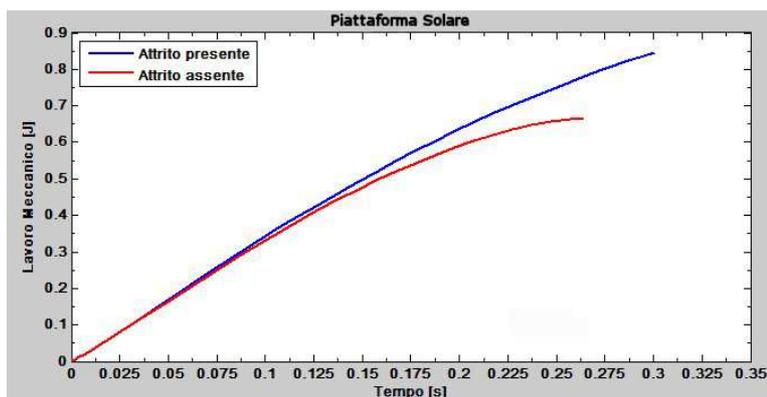


Figura 7.10 - Grafico dei lavori meccanici tetto solare mobile

Nel caso ideale all'istante di arresto della simulazione, il lavoro raggiunge il valore, che corrisponde al più grande che ha assunto sin quel momento, di 0,6676 J. Il valore è possibile leggerlo nel blocco Display prelevato dalla voce "Sinks" della libreria di Simulink. La forza applicata agli slider, accomunati dalla stessa potenza applicata (1 W), raggiunge come valore di picco 1215 N, corrispondente al massimo valore raggiunto e per di più raggiunto all'istante iniziale. Il suo raggiungimento all'istante iniziale è legato al fatto che questa forza è data dal rapporto tra potenza e velocità, e solo all'istante iniziale la velocità è tendente a zero. Il valore finale della forza è 4.173 N. Per quanto riguarda l'attuatore che eroga la potenza doppia, la forza iniziale è pari a 3200 N, quella finale è pari a 2.978 N.

Nel caso reale, ovvero nel caso con attrito colombiano combinato con quello viscoso, i valori del massimo valore di lavoro meccanico speso e di massima forza variano, aumentano. Dal blocco Display è possibile leggere che il lavoro assume come valore massimo, corrispondente come nel caso precedente al valore dell'istante finale della simulazione, di 0,8473 J. La forza, che applicano gli attuatori eroganti la stessa potenza, assume un valore iniziale sempre di 1215 N; ciò è abbastanza scontato in quanto la configurazione iniziale è identica in entrambi i casi. Successivamente a motivo dell'aumento della velocità diminuisce e raggiunge valori molto più bassi. Il valore finale, corrispondente anche a quello minimo, è di 5,459 N. L'attuatore che eroga la potenza doppia, ovvero quella di 2 W, inizialmente applica una forza pari sempre a 3200 N, infine una forza di 3,291 N.

Per quanto riguarda la libreria di Simulink, dalla voce "User-Defined Function" è stato prelevato il blocco che permette di inserire al suo interno la legge di attrito che si considera. Oggetto dello studio è l'attrito di Coulomb unito a quello viscoso. La legge inserita nel nostro schema è la (7-3):

$$\frac{v}{0.3+0.2v^2} \quad (7-3)$$

dove v è la velocità dell'elemento relativa a quello che lo precede nell'accoppiamento di cui si vuole studiare la dissipazione. L'idea è quella di approssimare la legge di attrito combinato, lineare con

discontinuità in zero. Bisogna approssimarla perché la discontinuità in zero crea problema durante la simulazione; è infatti presente una opzione di Simulink, detta Zero Crossing, che in presenza di 1000 o più zeri consecutivi rallenta fortemente la simulazione o addirittura la blocca. Per evitare questo inconveniente si è preferito utilizzare una legge che l'approssimi.

Dalla libreria di SimMechanics sono stati prelevati i blocchi Joint Sensor e Joint Actuator, dalla voce “Actuators & Sensors”. Il sensore è incaricato di registrare, nel tempo, i valori della velocità prima citata. L'attuatore, invece, ha il compito di attuare sull'accoppiamento la legge di attrito precedentemente illustrata. Oltre a garantire l'attrito, l'attuatore ha anche il compito di applicare le potenze motrici agli slider, nel modello con attrito e in quello senza.

E' infine utile precisare che è possibile variare alcuni parametri del modello in esame quali, ad esempio, masse e tensori d'inerzia, ottenendo di conseguenza diversi comportamenti dinamici [39].

8. REALIZZAZIONE DI UN TETTO SOLARE MOBILE

Avendo verificato la cinematica del tetto con entrambi i programmi, Matlab e SolidWorks, si è passati alla realizzazione pratica del modello. Naturalmente è stato realizzato un modello in scala del tetto mobile.

Ad oggi sono stati realizzati 3 prototipi di tetto i primi due hanno la stessa geometria ma diverso sistema di controllo (come vedremo nel prossimo capitolo) mentre il secondo ed il terzo hanno lo stesso sistema di controllo ma diversa geometria.

In questo capitolo verranno analizzati i prototipi realizzati esaminando anche i software e gli hardware necessari al loro funzionamento.

8.1. I PROTOTIPO

Il I modello di tetto mobile (Figura 8.1) è stato realizzato partendo dal modello 3D realizzato con SolidWorks. I pezzi modellati con suddetto software sono stati realizzati ed assemblati in un'officina meccanica.

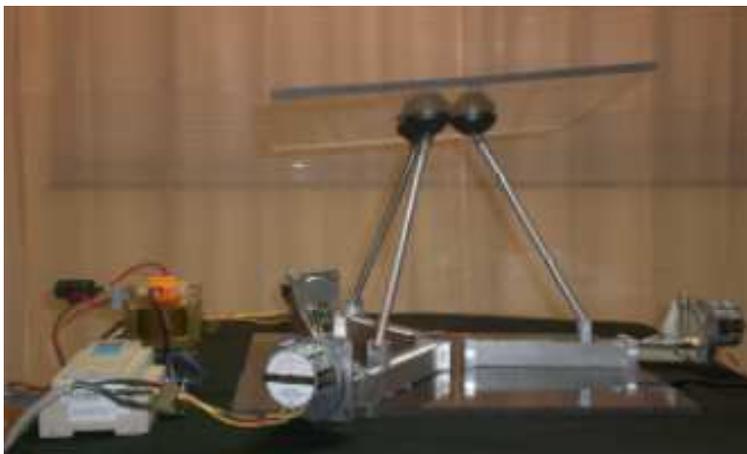


Figura 8.1 - I Prototipo di tetto solare mobile

Come detto il modello ha tre gradi di libertà e quindi viene comandato da tre motori che muovono le tre slitte. Questi tre motori vengono comandati attraverso un PLC.

Il controllore logico programmabile o Programmable Logic Controller (PLC) è un computer per industria specializzato nella gestione dei processi industriali. Il PLC esegue un programma ed elabora i segnali digitali ed analogici provenienti da sensori e diretti agli attuatori presenti in un sistema. Nel nostro caso invia gli impulsi ai 3 motori sincroni.

I problemi fondamentali di questo primo prototipo sono stati riscontrati proprio sui motori e sulla forma degli snodi sferici sotto il tetto. I primi motori montati erano troppo lenti e il loro controllo più complesso rispetto a quelli utilizzati per il secondo prototipo

8.2. II PROTOTIPO

I problemi riscontrati nel primo modello di tetto realizzato sono stati in parte risolti e superati con il secondo modello.

Questo, come ricordato precedentemente, ha la stessa struttura del primo ma il software per il controllo è differente Figura 8.2.

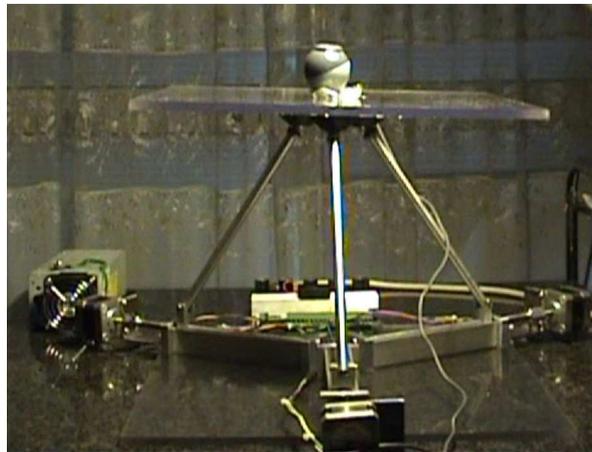


Figura 8.2 - II Prototipo di tetto solare mobile

Per la movimentazione sono stati utilizzati 3 motori step collegati attraverso una scheda di controllo ad una scheda USB della National Instruments. Al centro della base mobile è stata montata anche una fotocamera USB.

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

Come detto la struttura del II prototipo è la stessa del primo di conseguenza anche il loro funzionamento è lo stesso. I tre motori collegati alle tre slitte azionano le viti senza fine. Dalla rotazione di queste la guida filettata, che si trova sulla vite, si sposta in avanti. La guida è collegata da un cerniera (coppia rotoidale) all'asta e quindi questa descrive un certo angolo a seconda del moto della guida. L'asta a sua volta è collegata alla base mobile da tre giunti sferici che determinano l'orientazione della base stessa nello spazio. Gli studi si sono concentrati soprattutto su questo prototipo e gli sviluppi maggiori in termini di controllo sono stati presentati in alcuni lavori [40], [41], [42].

Un limite dei primi due prototipi è la presenza in entrambi di un collegamento con giunti sferici tra la base mobile e le aste. Questo giunto non garantisce infatti un movimento preciso del tetto.

8.3. III PROTOTIPO

Come già ricordato il terzo prototipo differisce dai precedenti per la diversa geometria ma il software di controllo è lo stesso utilizzato nel II prototipo. Questo prototipo risolve il problema del giunto sferico mantenendo i vantaggi in termini di controllo del secondo prototipo.

Il prototipo in questione è un robot ibrido che incorpora le proprietà di un robot parallelo e di uno seriale. Esso è dotato di due gradi di libertà.

Come per il precedente modello anche questa nuova geometria è stata rappresentata prima in ambiente CAD 3D con SolidWorks (Figura 8.3).

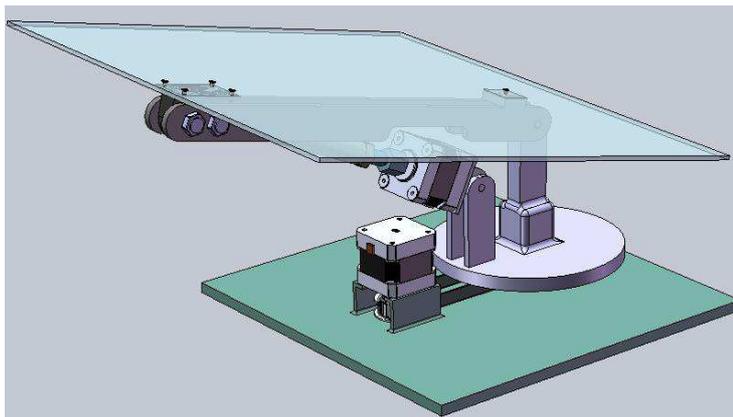


Figura 8.3 - III Prototipo in SolidWorks

Il prototipo è stato successivamente realizzato in officina (Figura 8.4)

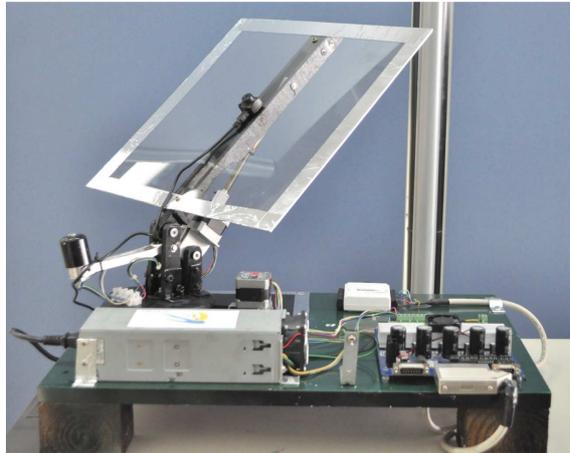


Figura 8.4 - III Prototipo di tetto solare mobile

8.3.1. FUNZIONAMENTO

Questo prototipo ha un funzionamento semplificato in quanto dotato di due gradi di libertà, ovvero due rotazioni tramite cui avviene l'orientazione. Tali movimentazioni avvengono per mezzo di due motori step: il primo è fissato tramite supporti alla base e, con una trasmissione cinghia/ruote dentate, permette la rotazione di un disco che può considerarsi in accoppiamento rotoidale con la base. Su di esso sono montati la staffa ed il secondo motore che permette la rotazione della staffa stessa per mezzo di un accoppiamento vite-madrevite connesso all'albero del motore ciascuno su un giunto di tipo cerniera che permette la rotazione ad entrambi (Figura 8.3).

Lo scopo di tutti i prototipi finora presentati è quello di orientare come detto la base mobile rispetto a quella fissa in modo da posizionare quest'ultima perpendicolarmente rispetto ai raggi solari. Si è pensato quindi a questa geometria allo scopo di coprire una larga fascia di angolazioni raggiungibili nell'orientazione del pannello. Infatti, attorno l'asse ζ , perpendicolare alla base, si può effettuare una rotazione completa di ben 360° , mentre l'inclinazione del pannello stesso intorno l'asse ξ , passante per la cerniera che collega la staffa al disco, può raggiungere una fascia di angolazioni che va da 0° (condizione di riposo – pannello orizzontale) a ben 90° (massima inclinazione – pannello verticale).

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

Come visto la posizione del sole è individuata soprattutto da due angoli:

- altezza solare: α (Figura 5.14);
- azimut: γ (Figura 5.15);

Il prototipo in esame quindi esegue due rotazioni riconducibili agli angoli che il sole forma con la superficie terrestre:

- l'azimut γ è riconducibile alla prima rotazione ζ .
- l'altezza solare α è riconducibile alla seconda rotazione ξ ;

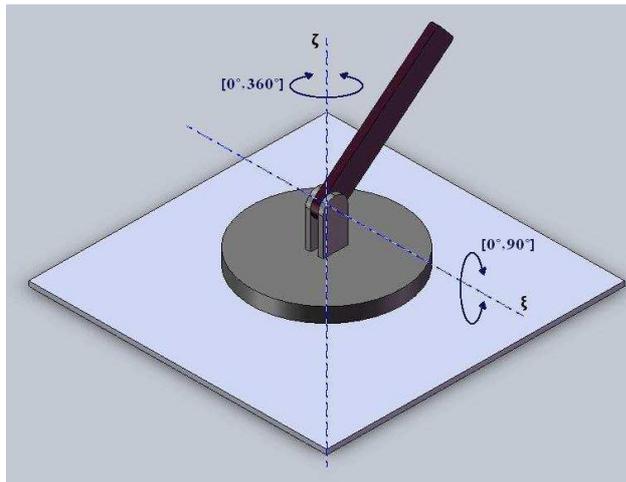


Figura 8.5 - Gradi di libertà del modello

La movimentazione di questo prototipo è risultata più precisa di quella dei precedenti offrendo anche altri vantaggi. A fronte di una maggiore complessità costruttiva offre, oltre alla possibilità di raggiungere angoli maggiori, anche una minore altezza del tetto a riposo. Questo parametro è importante qualora si intenda realizzare un modello per autovetture perché ridurrebbe ingombri e quindi anche problemi aerodinamici e di stabilità.

8.4. GLI HARDWARE

8.4.1. MICROCAMERA USB

Come detto sulla base mobile è montata una microcamera. Il modello è Micro USB 2.0 Color Camera System 8 Mp della Edmund Optics Worldwide (Figura 8.6).



Figura 8.6 - Micro USB 2.0 Color Camera System

Ha una solida struttura in magnesio, smaltato di nero. Con una risoluzione di 8 Mp in modalità fotocamera è, inoltre, dotata di una lente integrata con capacità di autofocus, riconoscimento automatico dei volti, stabilizzazione e controllo automatico dell'immagine, e una conversione interna dei colori. È stato verificato sperimentalmente, infine, che non si verificano condizioni di saturazione dei colori qualora la fonte luminosa sia quella solare.

8.4.2. SCHEDA NI USB-6009

La scheda utilizzata (Figura 8.7) è un prodotto dalla National Instruments.



Figura 8.7 - Scheda NI USB-6009

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

È uno strumento portatile e a basso costo per l'acquisizione dati multifunzione (DAQ) per USB che fornisce 48 kS/s ad una risoluzione di 14 bit. Il modulo include 8 input analogici single-ended (4 differenziali) (14 bit, 48 kS/s), 2 output analogici (12 bit, 150 kS/s), 12 linee I/O digitali (5 V TTL/CMOS), in grado di offrire funzionalità DAQ multifunzione, ed un counter 32 bit. L'alimentazione avviene tramite Bus USB 2.0 per elevata mobilità e connettività del segnale.

Proprio attraverso questa porta passa l'input mentre l'output è reso disponibile in formato digitale dal connettore dedicato. Le linee occupate sono nove in totale: una dedicata al GND (Ground), le altre otto sono assegnate dalla porta P0.0 alla P0.7.

8.4.3. SCHEDA DI GESTIONE DEI MOTORI

I dati ottenuti in ambiente LabVIEW, ed inviati alla scheda USB per il controllo dei motori, sono valori numerici che necessitano di essere convertiti in una sequenza di segnali digitali, o meglio, di impulsi elettrici da inviare ai due motori step.

Tale conversione avviene in due fasi successive, attraverso una strumentazione hardware dedicata (Figura 8.8).



Figura 8.8 - Driver motore step TB6560

Tramite porta seriale i dati sono inviati alla Scheda di Gestione dei Motori, che codifica il segnale della scheda NI USB-6009, e lo inoltra sotto forma di impulsi elettrici ai due motori step.

Gli input sono costituiti, quindi, dalla porta seriale e dal connettore di alimentazione della scheda.

L'output, invece, è reso disponibile dalle morsettiere verdi (in alto a destra nella Figura 8.8).

Per alimentare la Scheda di Gestione dei Motori si è fatto ricorso ad un alimentatore per PC Delta Electronics®, modello DPS-180MB-1 A (Figura 8.9).

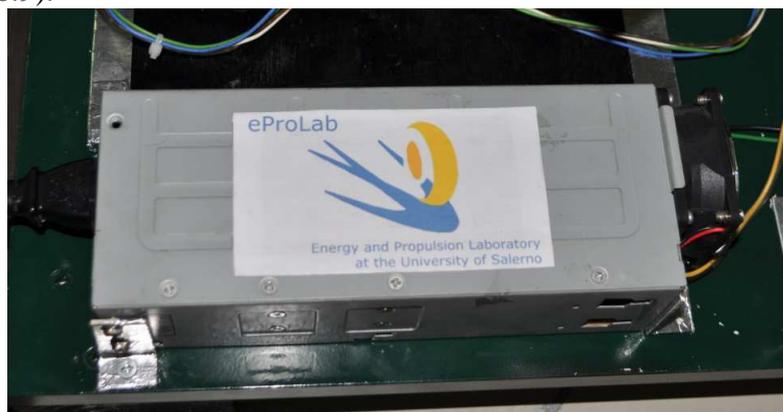


Figura 8.9 - Alimentatore Delta Electronics®

8.4.4. MOTORI STEP

Nel modello realizzato si sono adoperati i motori passo-passo NEMA 17 della Vexta® .



Figura 8.10 - Motori Vexta

I motori passo-passo sono un particolare tipo di motore elettrico sincrono, alimentati in corrente continua, senza spazzole, e che possono suddividere la propria rotazione in un grande numero di step, avendo la caratteristica di funzionare a "scatti" (cioè per passi). Trovano largo impiego in tutte quelle applicazioni laddove sia necessario raggiungere

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

una ben precisa posizione dell'albero di un motore, che può essere anche controllata tramite un closed loop (ovvero controllo in feedback). Maggiori applicazioni si hanno nel campo della robotica e della meccanica di precisione, in quanto, una volta raggiunta la posizione desiderata, essi si mantengono stabili in questa, bloccando il rotore.

8.5. I SOFTWARE

L'orientazione del tetto mobile avviene per mezzo di due software in comunicazione tra di loro e i quali si interfacciano con l'ambiente esterno ciascuno attraverso un hardware ad esso collegato.

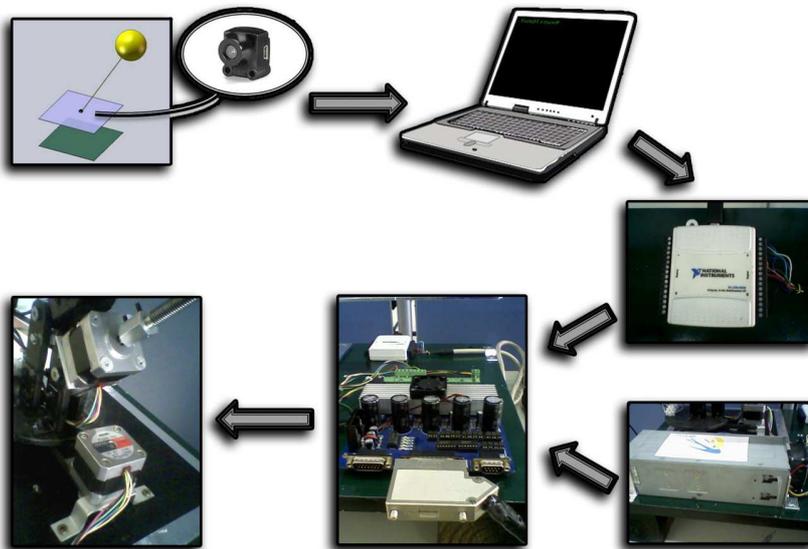


Figura 8.11 - Diagramma di flusso dei software utilizzati

8.5.1. MATLAB

Il primo dei due software utilizzati è MATLAB. Ai fini della movimentazione del tetto, tale software è stato utilizzato nell'elaborazione dell'immagine acquisita dalla fotocamera: essa viene di fatto inserita in un sistema di assi cartesiani con scala in pixel, su cui sono evidenziati il centro dell'immagine stessa, identificato con una croce blu,

ed il punto di massima concentrazione di luce, identificato con un asterisco rosso (Figura 8.12).

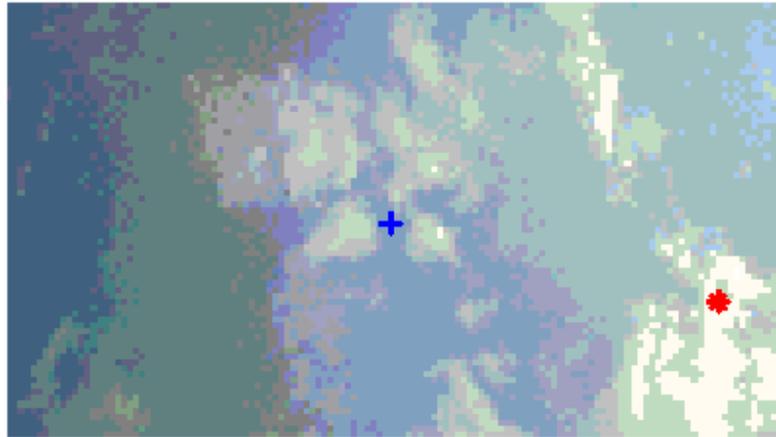


Figura 8.12 - Identificazione del punto di massima illuminazione

Il codice è strutturato in varie fasi:

- acquisizione dell'immagine;
- rappresentazione della stessa come una matrice di pixel;
- individuazione delle coordinate assolute del punto di massima illuminazione;
- individuazione delle coordinate assolute del centro dell'immagine;
- individuazione delle coordinate relative del punto di massima illuminazione (in riferimento al centro dell'immagine).

L'output di questa analisi è, quindi, una coppia di coordinate cartesiane, identificative del punto rosso, che costituiscono l'input per la parte di software sviluppata in ambiente LabVIEW.

L'obiettivo, come accennato, consiste nel far sì che i raggi solari incidano perpendicolarmente alle celle fotovoltaiche. Quindi il sistema deve spostarsi da una configurazione iniziale (Figura 8.13) ad una finale (Figura 8.14) che si traduce nello spostamento del punto rosso sul piano cartesiano dalla sua posizione generica fino a coincidere con il centro dell'immagine, ovvero il punto blu.

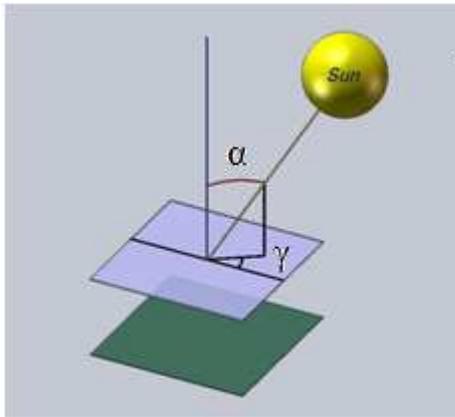


Figura 8.13 - Configurazione iniziale

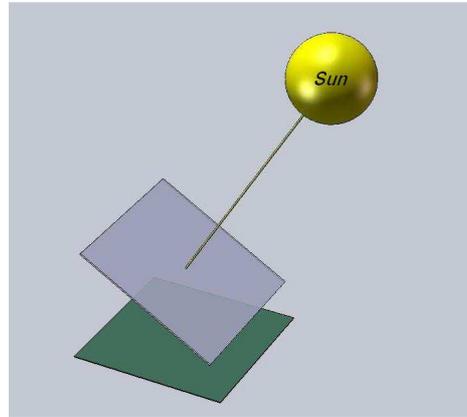


Figura 8.14 - Configurazione orientata

Ottenuta la coppia di coordinate, essa costituisce il punto di partenza per la parte di linguaggio sviluppata in LabVIEW.

Al fine di ottenere il dovuto allineamento, la movimentazione del pannello dovrebbe idealmente avvenire per mezzo di due spostamenti. Come precedentemente detto, tali spostamenti corrispondono alla rotazione azimutale ed alla rotazione di tilt:

- il primo spostamento serve per posizionare il punto rosso (rilevato sulla foto acquisita tramite microcamera) sul semiasse negativo delle ascisse del sistema di assi cartesiani che ha origine nel punto blu; ciò avviene come rotazione del punto rosso attorno a quello blu;
- il secondo serve a far coincidere il punto rosso con quello blu; ciò corrisponde ad una traslazione del primo punto, lungo il suddetto semiasse, fino a convergere nel punto blu.

Per evitare che il sistema entri in loop, qualora non riesca a far coincidere i due punti, è comunque previsto un range di tolleranza del decimo di pixel.

Movimentazioni ulteriori sono ammesse nel caso in cui, durante la fase di acquisizione dell'immagine, si verifichi uno spostamento del punto di maggiore illuminazione, ad esempio a causa del sopraggiungere di una nuvola, o di un qualsiasi altro corpo, che possa rappresentare un filtro, o un ostacolo, al passaggio della luce. Ciò costituisce un punto di forza, in quanto tale controllo (in feedback) consente al modello di adattarsi in

tempo reale ad ogni condizione di luce, ossia rende più accurata l'orientazione.

Suddetto controllo si rivela utile soprattutto perché riduce la dipendenza dell'orientazione dai giochi negli accoppiamenti e dall'imprecisione nelle movimentazioni che caratterizzano il prototipo. Essi si possono individuare in:

- effetti dissipativi di tipo attrito tra i giunti (cuscinetti assiali e di spinta della ruota mossa);
- perdita di passi dei motori step e slittamento tra albero motore e ruota dentata (condizioni che si possono verificare nel caso in cui, a causa degli attriti, la coppia resistente sia maggiore della motrice);
- oscillazioni degli elementi (disco di supporto e staffa mobile);
- errori nella conversione del segnale (che possono avvenire tanto in ambiente software quanto nell'hardware).

8.5.2. *LABVIEW*

Viene acquisita l'immagine con la microcamera ed inviata alla CPU tramite cavo USB 2.0. Con il software MATLAB viene effettuata l'acquisizione, l'elaborazione e la conversione di tale immagine il cui output si concretizza in una coppia di coordinate cartesiane che identifica il punto di massima illuminazione ed è, al contempo, l'input della parte di software realizzata con LabVIEW. Il risultato di tale elaborazione è un'informazione che viene gestita successivamente dalla scheda NI USB-6009 (collegata anch'essa per mezzo di un cavo USB 2.0) ed inviata, tramite un cavo con porta seriale, alla scheda di gestione dei motori. Il risultato finale è una corrente che alimenta i motori step (tre nel caso in esame e due per il terzo prototipo) per il tempo necessario alla movimentazione. Successivamente con il pannello fotovoltaico viene acquisita la radiazione solare.

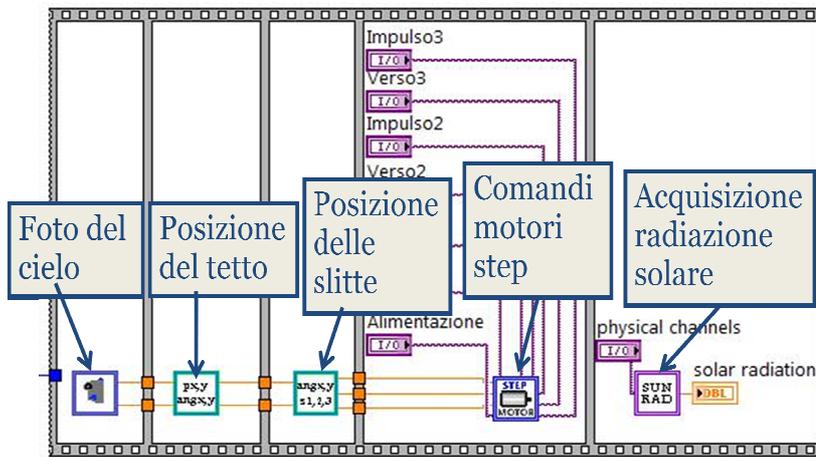


Figura 8.15 - Block Diagram dell'automazione del prototipo

8.5.3. ANALISI DI UNA SIMULAZIONE

In Figura 8.16 è rappresentata la sequenza di fotogrammi acquisiti dalla microcamera all'inizio di ogni sua movimentazione. È evidente, dal numero riportato nell'angolo in alto a destra di ogni fotogramma, che sono state necessarie ben diciassette movimentazioni. Questo perché il modello ha dovuto correggere gli errori di movimentazione caratterizzanti il prototipo.

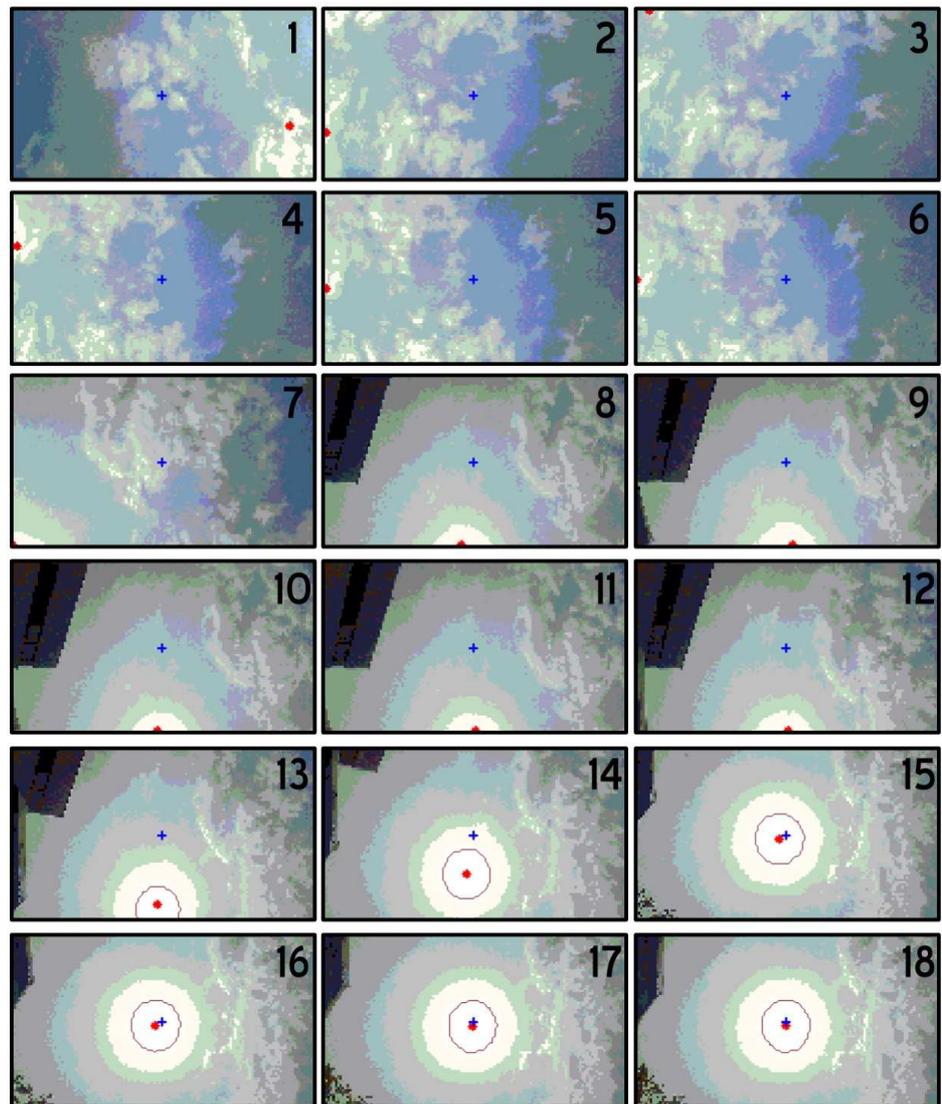


Figura 8.16 - Sequenza di fotogrammi

In base alle informazioni rilevate nel fotogramma n° 1, viene effettuata la prima rotazione, ovvero quella azimutale: a causa della presenza di nuvole e di errori nella trasmissione del moto, il modello ha dovuto effettuare più di una movimentazione (ben cinque) fino a

convergere nella posizione desiderata, ovvero quella situata in prossimità del semiasse negativo delle ascisse, con un margine di errore del decimo di pixel, come mostrato nel fotogramma n° 6 (Figura 8.17).

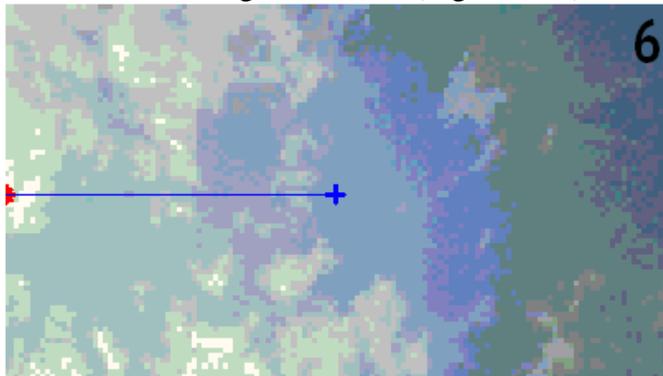


Figura 8.17 - Allineamento sul semiasse negativo delle ascisse

Dalle informazioni rilevate nel fotogramma n° 6 fino al n° 11 viene effettuata la rotazione di tilt. L'errore è presto verificabile: nel caso ideale la traslazione del punto rosso sarebbe dovuta avvenire lungo il semiasse blu di Figura 8.17; invece, è ben visibile che tale punto si è spostato verso il margine inferiore dell'immagine ed ha effettuato una traslazione lungo di esso fino a convergere con l'asse delle ordinate (Figura 8.18).

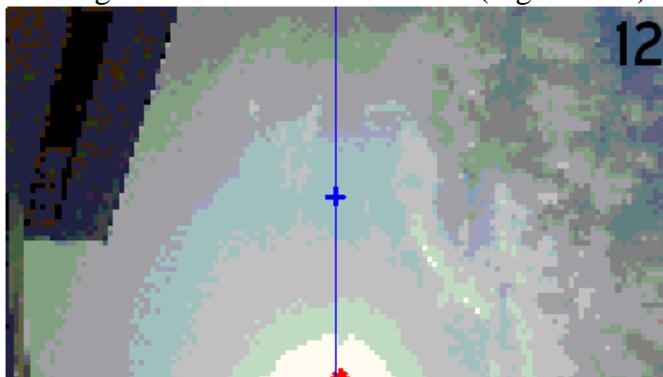


Figura 8.18 - Allineamento con l'asse delle ordinate

In virtù del controllo in feedback di cui è dotato il sistema, l'errore viene corretto ripetendo le operazioni di orientazione secondo la stessa sequenza, con un crescente aumento della precisione ad ogni step successivo.

In base alle informazioni acquisite a partire dal fotogramma n° 12 fino a quelle relative al n° 14, viene effettuata una seconda rotazione azimutale, che termina nel momento in cui il punto rosso si è posizionato in prossimità del semiasse delle ascisse (fotogramma n° 15 di Figura 8.19).

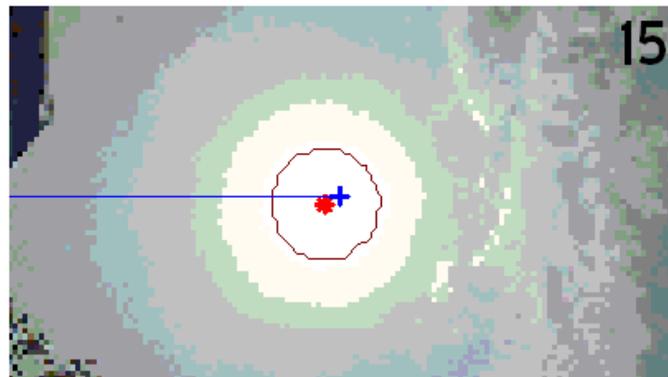


Figura 8.19 - Seconda rotazione azimutale

Le informazioni rilevate nel fotogramma n° 15 indicano che è avvenuto un corretto allineamento con il semiasse blu di Figura 8.19, per cui può cominciare la seconda orientazione di tilt che prosegue fino al fotogramma n° 17. Il sistema si ferma nel momento in cui, acquisendo un'ulteriore immagine (fotogramma n° 18 di Figura 8.20), le informazioni rilevate indicano che è avvenuto anche il secondo allineamento, in quanto il punto rosso coincide con il punto blu (sempre ammettendo uno scarto del decimo di pixel). A tale acquisizione, quindi, non segue nessuna movimentazione. Motivo per cui l'immagine ha validità semplicemente illustrativa.

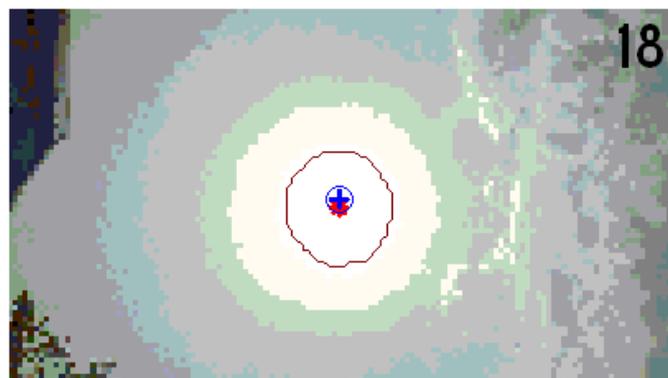


Figura 8.20 - Allineamento completato

9. CONTROLLO DEL TETTO SOLARE MOBILE

In questo capitolo si parlerà del controllo dei prototipi di tetto solare mobile facendo riferimento a quelli comandati dal software LabVIEW (il secondo ed il terzo). In particolare si farà riferimento al II prototipo perché su questo sono stati presentati un numero maggiore di lavori [40][41][42]. Resta inteso che quanto verrà detto vale, in termini di controllo, anche per il terzo prototipo.

9.1. STRATEGIA DI CONTROLLO

Per decidere se orientare o meno il tetto, si vuole proporre di combinare l'uso di dati provenienti dal GPS, dalla fotocamera e dai pannelli solari.

In Figura 9.1 riportato il diagramma di flusso che mostra il funzionamento dell'algoritmo di automazione proposto per il tetto solare mobile.

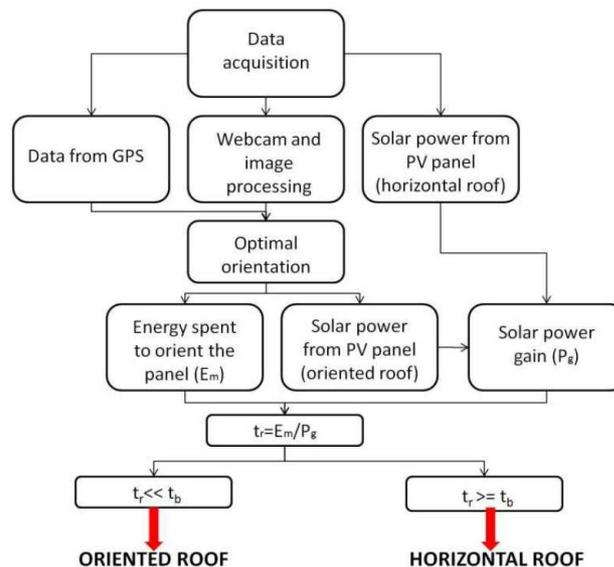


Figura 9.1 - Strategia di controllo

Si acquisiscono dati attraverso i tre dispositivi hardware precedentemente elencati e connessi al tetto mobile. I primi due ci informano sull'orientazione ottimale del tetto, ed il terzo funziona come una sorta di sensore.

Tramite i dati provenienti dal GPS e le formule (5-11) e (5-12) già viste, in precedenza, si è in grado di conoscere la posizione del sole.

Nel caso reale, però, la posizione che massimizza l'energia catturata può essere diversa dalla posizione teorica. Tra le varie cause la prima è da attribuire alle condizioni meteo, che potrebbero non essere favorevoli all'orientazione. Bisogna poi considerare l'eventuale presenza di ostacoli, o superfici riflettenti, tra il veicolo e il sole che potrebbero variare la posizione ottimale da raggiungere. La fotocamera, quindi, ha lo scopo di evidenziare attraverso un scala cromatica la presenza di nubi e attraverso la foto stessa l'eventuale presenza di ostacoli.

Attraverso questi due strumenti si arriva a conoscere qual è l'orientazione ottimale del tetto.

Gli angoli ottimali del tetto che massimizzano la componente diretta dell'energia solare possono essere calcolati in funzione dell'azimut del sole γ_s e l'azimut del veicolo γ_v

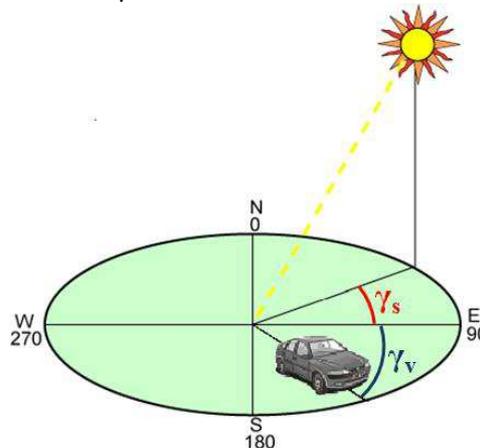


Figura 9.2 - Azimut del sole e azimut del veicolo

Una volta nota la posizione che deve assumere il tetto attraverso la strumentazione descritta si può risalire al moto da imporre ai motori (tre nel caso in esame e due per il terzo prototipo). Quest'ultima informazione

ci permette di stimare l'energia meccanica necessaria a movimentare il tetto.

$$E^m(\bar{t}, \bar{t} + \Delta t) = E_0^m + E_1^m(\Delta\alpha, \Delta\gamma) \quad (9-1)$$

L'energia meccanica, tra due posizioni consecutive, è somma, come si vede, di due contributi: uno indipendente dalla traiettoria che si segue (E_0^m) e l'altro dipendente dalla traiettoria E_1^m .

Il primo termine E_0^m dipende da:

- Perdite elettromeccaniche dissipate nei motori (E_a).
- Perdite nelle coppie cinematiche a causa dell'attrito di scorrimento e rotolamento tra le coppie meccaniche (E_f).
- Variazioni dell'energia cinetica dovute ai transitori di avvio (E_k).

Questo termine rappresenta quindi una sorta di pedaggio iniziale per qualsiasi movimento del tetto solare. Questa quantità ha un forte impatto sulla valutazione del tempo minimo tra azionamenti successivi del tetto come vedremo più avanti. Bisogna ricordare poi che questo termine nella somma è sempre diverso da zero.

$$E_0^m = E_a + E_f + E_k \quad (9-2)$$

Un problema simile viene affrontato in alcuni paper [45], [46] valutando E_a come somma di: perdite nelle armature di rame e di ferro, perdite per correnti parassite, perdite per contatto tra le spazzole e perdite per attrito nei motori DC.

Il secondo termine E_1^m è proporzionale a:

- Distanza tra posizione iniziale e finale del tetto.
- Angolo di incidenza "i" che a sua volta dipende dalla differenza di altezza solare e azimut tra la posizione iniziale e la finale.

Una volta calcolata l'energia meccanica necessaria a raggiungere la posizione ottimale, si può calcolare, tramite le formule già viste, quale sarebbe l'energia catturata dal tetto in questa posizione.

Qui entra in gioco il pannello solare perché ci fornisce indicazioni sull'energia catturata dal pannello in posizione orizzontale (o comunque nella posizione in cui si trovava precedentemente)

La differenza tra l'energia catturata se il pannello fosse orientato e quella se il pannello resta fisso rappresenta il guadagno di energia solare.

$$P_g = P_{or} - P_{hr} \quad (9-3)$$

Dove P_{or} è la potenza solare catturata dal tetto orientato (**oriented roof**) e P_{ho} è la potenza solare catturata, invece, dal tetto orizzontale (**horizontal roof**).

Dal rapporto tra energia meccanica e guadagno di energia solare (che ha le dimensioni di una potenza) si ottiene il tempo di recupero dell'energia spesa per l'orientazione.

$$t_r = \frac{E^m}{P_g} \quad (9-4)$$

Se questo tempo è minore di un tempo specifico, imposto per esempio dall'utente (il tempo di parcheggio ovvero il tempo di una sosta breve) allora si decide di orientare il tetto. Viceversa si lascia il tetto in posizione orizzontale (ovvero nella posizione precedente).

9.1.1. CASO STUDIO

Una simulazione è stata effettuata a Salerno. È stato necessario, quindi, confrontare l'energia richiesta per raggiungere una specifica orientazione del tetto con il guadagno di energia solare tra la posizione ottimale e la posizione attuale. Il tempo minimo richiesto per recuperare l'energia spesa per la movimentazione è dato dalla formula (9-4).

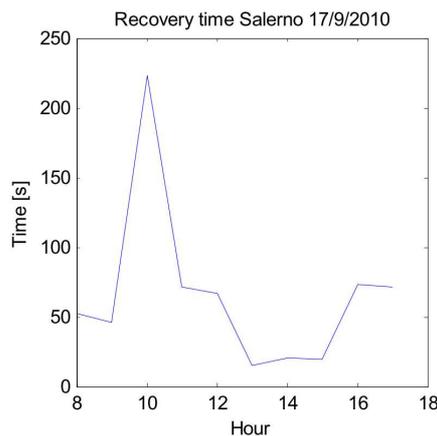


Figura 9.3 - Tempo di recupero a Salerno

Il tempo di recupero è stato calcolato nell'arco di una giornata, come se ad ogni ora dovessi orientare il tetto ed in Figura 9.3 viene riportato il grafico.

Come si può vedere il tempo massimo di recupero è di circa 4 minuti (intorno alle 10). Per il resto della giornata il tempo di recupero ha un andamento piuttosto costante. L'effetto del picco potrebbe essere dovuto a fattori di ombreggiamento (nuvole) che abbassando l'energia captata dal pannello, hanno aumentato il tempo di recupero.

Come abbiamo più volte ribadito i veicoli ibridi solari vengono impiegati per un tipico uso urbano (molte persone usano la loro auto per brevi tragitti e con una sola persona a bordo [12]). Ovviamente in questi casi il veicolo resta parcheggiato per la maggior parte del giorno.

Il tempo di recupero, quindi, può essere considerato trascurabile confermando così la convenienza del tetto solare mobile.

9.2. STRATEGIA DI INSEGUIMENTO

Da quanto emerso nei precedenti paragrafi, risulta necessaria l'implementazione, per il prototipo in esame, di una strategia di inseguimento, tracking strategy appunto.

L'obiettivo principale della tracking strategy è la scelta dell'intervallo di tempo ottimale tra due orientazioni consecutive Δt_{min} .

La soluzione migliore sembrerebbe quella di avere un orientatore solare continuo. Ciò però non è possibile a causa dell'energia meccanica di primo distacco che come visto prima è sempre diversa da zero (9-2).

L'intervallo di tempo ottimale Δt_{min} prima dell'orientazione successiva può essere calcolato attraverso la minimizzazione della seguente funzione (9-5):

$$\min_{\Delta t} \frac{\int_{\bar{t}}^{\bar{t}+\Delta t} \left[\dot{E}_t^S(t) - \dot{E}_t^S(\bar{t}) \right] dt + E^m(\bar{t}, \bar{t} + \Delta t)}{\Delta t} \quad (9-5)$$

La funzione da minimizzare è somma di due termini: le perdite di potenza solare e l'energia meccanica spesa.

Le perdite di potenza solare a loro volta sono somma della:

- potenza solare catturata da un inseguimento continuo $\dot{E}_t^S(t)$;

- potenza solare catturata quando il tetto si trova in posizione fissa $E_t^S(t)$.

L'energia meccanica spesa per movimentare il tetto viene calcolata in riferimento alla posizione al tempo \bar{t} e quella alla posizione ottimale al tempo $\bar{t}+\Delta t$

L'analisi di simulazione è stata eseguita a Salerno partendo da dati riferiti all'energia catturata da un pannello fisso (linea blu) ed uno ad inseguimento (linea rossa) in condizioni di cielo sereno .

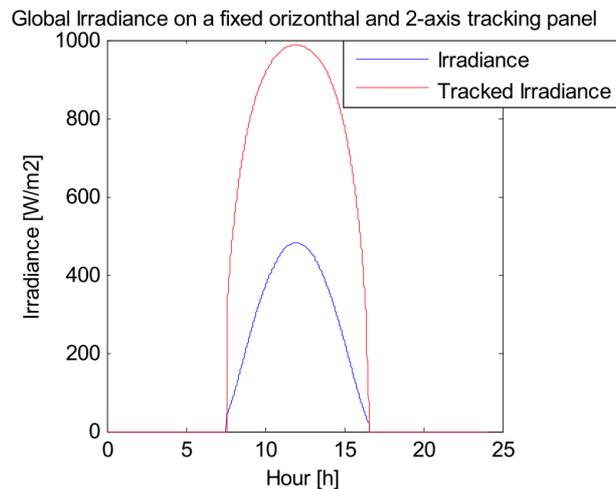


Figura 9.4 - Radiazione solare a Salerno su due superfici captanti

Prima di passare al calcolo del Δt_{\min} occorre fare una precisazione. Come si è detto si deve calcolare Δt_{\min} perché è impensabile ottenere un orientamento continuo del tetto e questo comporta delle inevitabili perdite. Infatti è chiaro che in tutto l'intervallo Δt che il tetto rimane nella stessa posizione il pannello cattura meno energia di quanto non ne potrebbe catturare orientandosi continuamente. Occorre, quindi, scegliere anche l'istante preciso in cui iniziare ad orientarlo. Se per esempio dai calcoli risulta che dalle 8 alle 9 il Δt_{\min} tra due orientazione consecutive è di 1 ora il tetto può essere orientato all'inizio dell'ora (alle 8) oppure a metà dell'intervallo Δt (alle 8 e 30) con l'orientazione ottimale che dovrebbe avere all'inizio dell'intervallo (alle 8).

Sperimentazione e controllo di un veicolo ibrido-solare con tetto orientabile

Proprio in base a queste considerazioni sono state calcolate le perdite di potenza rispetto ad un inseguitore solare (Figura 9.5) in due casi diversi ad un prefissato Δt_{\min} (1 ora). Quando il tetto solare viene orientato all'inizio (linea nera) e a metà (linea rossa) di ogni intervallo Δt_{\min} tra un'orientazione e la successiva.

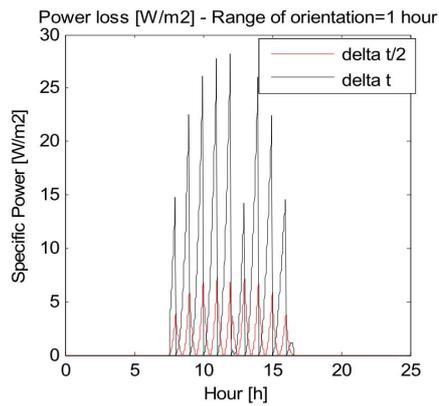


Figura 9.5 - Perdite di potenza rispetto ad un inseguitore solare ($\Delta t=1$ ora)

Come risulta dalla Figura 9.5, e come era già intuibile, nel secondo caso le perdite sono minori. Si decide quindi di orientare il tetto seguendo quest'ultimo criterio. Tornando al calcolo del tempo minimo di recupero è naturale che le perdite di potenza solare hanno valori differenti durante il giorno essendo influenzate dalla radiazione solare e dal suo gradiente.

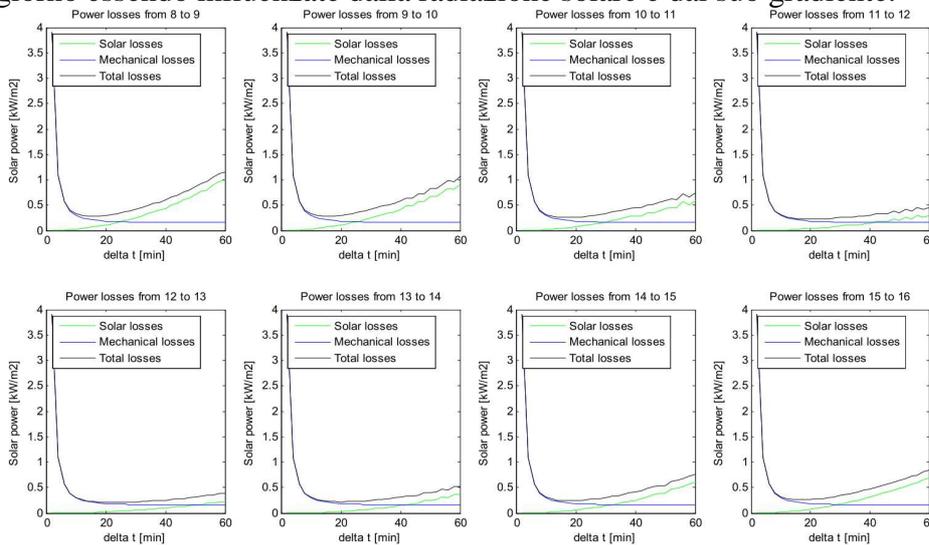


Figura 9.6 - Δt_{\min} durante una giornata a Salerno

Quindi basandosi sui dati visti precedentemente (Figura 9.4) è stato possibile calcolare il Δt_{\min} durante un giorno per tutte le fasce orarie (Figura 9.6).

Si può notare che il valore di Δt_{\min} è molto basso la mattina e il tardo pomeriggio, ed assume il valore più alto a mezzogiorno circa.

Sono stati calcolati, infine, gli intervalli di tempo minimi a differenti stagioni e differenti condizioni del cielo.

I risultati sono mostrati in Figura 9.7.

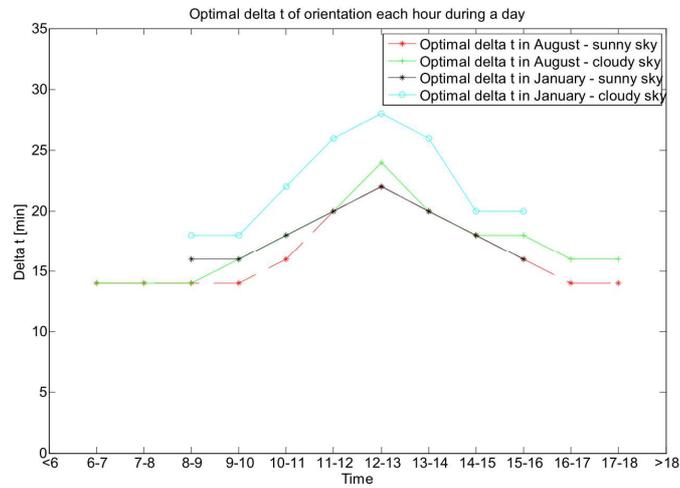


Figura 9.7 - Δt_{\min} a differenti stagioni e per differenti condizioni del cielo

Dalle considerazioni fatte finora si evince, quindi, che è consigliabile adottare la strategia di controllo presentata, al fine di massimizzare i vantaggi di un tetto solare mobile nei veicoli ibridi solari.

10. CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi, che riguarda la ricerca affrontata nel triennio di dottorato di ricerca svolto, l'attenzione è stata rivolta alle alternative alle attuali autovetture.

Partendo dalla considerazione che l'energia solare è una delle fonti di energia che si cerca maggiormente di utilizzare perché non inquinante e rinnovabile, si è pensato, come auto alternative, alle auto solari.

L'auto alimentata soltanto dal sole resta, però, un obiettivo irrealizzabile in tempi brevi almeno restando ad una concezione di auto più o meno vicina a quella attuale. L'obiettivo di ridurre, quindi, in modo sensibile consumi ed emissioni attraverso l'integrazione del fotovoltaico sulle auto passa attraverso le auto elettriche o ibride. A medio-lungo termine, le presumibili ulteriori riduzioni di prezzo ed i miglioramenti di rendimento delle celle fotovoltaiche, integrate a partire dalla fase di progetto in veicoli a basso consumo energetico, potranno portare ad un'autonomia quasi completa, almeno per quella larga parte degli automobilisti che usa l'auto prevalentemente in ambito urbano per poche ore al giorno. Tra l'altro, l'adozione di un tetto orientabile per le fasi di parcheggio e di celle fotovoltaiche sulle superfici laterali potrà incrementare in modo sensibile l'energia raccolta, in particolare alle latitudini più elevate, estendendo così il potenziale mercato per questi veicoli.

L'attività di ricerca è stata incentrata principalmente su questi due temi appena discussi: studio di un veicolo ibrido solare ed integrazione su questo di un tetto solare mobile.

La prima parte ha riguardato lo studio di una strategia di controllo per la gestione energetica ottimale a bordo di un veicolo ibrido solare (Hybrid Solar Vehicle – HSV) con struttura serie. Questo veicolo è in dotazione al dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Salerno. Si tratta di un Porter Van Glass della Microvett, un veicolo elettrico convertito a ibrido solare grazie all'integrazione sul tetto di pannelli solari.

La strategia di controllo è denominata Rule-Based. L'architettura di controllo RB è costituita da due loop principali: uno esterno, che determina, in funzione del contributo solare atteso durante la fase di parcheggio, lo stato di carica della batteria (SOC) da raggiungere al

termine della fase di guida; il secondo, interno, i cui obiettivi sono, da una parte, l'individuazione dello scheduling ottimale del gruppo generatore, e, dall'altra, il controllo dell'oscillazione del SOC intorno al valore finale indicato dal primo ciclo.

Le prestazioni ottenibili dall'architettura RB sono state analizzate attraverso un'approfondita analisi di simulazione. Tale simulazione, eseguita in real time sul veicolo, ha dimostrato l'elevata potenzialità offerta dalla strategia proposta.

La seconda parte è stata dedicata alla progettazione ed alla realizzazione di un tetto solare mobile per un veicolo ibrido solare. Questo modello è stato realizzato con il software SolidWorks. Come conoscenze di base sono state utilizzate l'influenza dell'angolo di incidenza sulla frazione di energia raccolta rispetto all'energia incidente, la radiazione solare differente per ogni luogo, e la cinematica dei robot paralleli.

Come si può ben capire inclinando opportunamente i pannelli si accumula più energia solare. Quindi si può immaginare come un pannello mobile è più conveniente di uno fisso. Ciò è stato sottolineato dall'utilizzo di un simulatore americano PVWATTS (valido per i paesi americani). Dato che la radiazione solare varia a seconda del luogo di riferimento, a tale simulatore occorre fornire come dati di ingresso latitudine e longitudine del luogo, angolazione del pannello fisso o pannello mobile orientabile su due assi. In tal modo si è potuto verificare il guadagno di un pannello orientabile su due assi rispetto a uno fisso. Da questi risultati è stata confermata la convenienza di avere un tetto mobile.

Il modello è stato progettato con l'ausilio di due software: MATLAB e SolidWorks. Successivamente sono stati realizzati ed automatizzati tre prototipi in scala.

È stato dimostrato come l'uso di un tetto solare mobile durante le fasi di parcheggio può dare un contributo rilevante per aumentare l'energia solare catturata nei veicoli ibridi solari.

Inoltre il contributo percentuale può essere particolarmente significativo alle alte latitudini, contribuendo così a estendere il potenziale mercato di questi veicoli.

Al fine di migliorare i benefici del tetto in oggetto, il consumo di energia legato al suo movimento deve essere minimizzato, e devono essere evitati i movimenti non necessari. A tal fine è stata presentata una

procedura di controllo basata sull'uso combinato dei dati di energia solare forniti dal pannello solare, sulle informazioni ricavate da un modulo GPS ed elaborando le immagini del cielo scattate da una fotocamera digitale. A questo scopo è stato sviluppato un sistema di controllo implementato in LabVIEW e testato sui prototipi su scala ridotta in condizioni di luce artificiale.

Inoltre è stata presentata una strategia che permette di determinare l'intervallo ottimale di tempo tra due orientamenti consecutivi del tetto. Quest'intervallo dipende dalle ore del giorno, dalle stagioni dell'anno e dalle condizioni reali del cielo.

Dalle considerazioni fatte si evince, quindi, che è consigliabile adottare la strategia di controllo presentata, al fine di massimizzare i vantaggi di un tetto solare mobile nei veicoli ibridi solari.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Rizzo, “Il sole con le ruote: dieci domande sull’uso dell’energia solare per le auto”, 2010.
- [2] M. Matteucci, “Storia dell’Automobile”, Editrice Ediprint 1967.
- [3] G. Messadié, “Le grandi invenzioni dall’antichità al 1850”, Vallardi, 1990.
- [4] <http://www.dimec.unisa.it/Leonardo>
- [5] “Kyoto Protocol: Status of Ratification”. United Nation Framework Convention on Climate Change (2008-10-16).
- [6] V. Smil, (2006), “Energy at the Crossroads”, Global Science Forum Conference on Scientific Challenges for Energy Research, Paris, May 17-18, 2006.
- [7] <http://www.centrometeolombardo.com>
- [8] <http://oldweb.ct.infn.it>
- [9] <http://www.filmsottile.it>
- [10] <http://www.solarroadways.com>
- [11] <http://www.erec.org>
- [12] Statistics of Road Transport, www.statistics.gov.uk
- [13] www.ni.com
- [14] J. Conway, S. Watts, “A software engineering approach to LabVIEW”, Prentice Hall Professional, 2003.
- [15] B. Baumann, G. Rizzoni and G. Washington, “Intelligent Control of Hybrid Vehicles using Neural Networks and Fuzzy Logic”, SAE paper 981061, 1998.
- [16] L. Guzzella and A. Amstutz, “CAE Tools for Quasi-Static Modeling and Optimization of Hybrid Powertrains”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 48, no. 6, November 1999.
- [17] I. Arsie, M. Graziosi, C. Pianese, G. Rizzo, M. Sorrentino (2004), “Optimization of Supervisory Control Strategy for Parallel Hybrid Vehicle with Provisional Load Estimate”, AVEC’04, Arnhem (NL), Aug.23-27, 2004.
- [18] Bin Wu, Chan-Chiao Lin, Zoran Filipi, Huei Peng, Dennis Assanis, “Optimal Power Management of a Hydraulic Hybrid Delivery Truck”, *Vehicle System Dynamics 2004*, Vol. 42, Nos. 1–2, pp. 23–40, 2004.

- [19] Chan-Chiao Lin, Jun-Mo Kang, J.W. Grizzle, Huei Peng, “Energy Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck”, 2001 American Control Conference, Arlington, VA June 25-27, 2001.
- [20] Chan-Chiao Lin, Huei Peng, and J.W. Grizzle, “A Stochastic Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles”, 2004 American Control Conference, Boston, Massachusetts, June 30 -July 2, 2004.
- [21] I. Arsie, G. Rizzo, M. Sorrentino, “Optimal Design and Dynamic Simulation of a Hybrid Solar Vehicle”, SAE paper 2006-01-2997, SAE Transactions – Journal of Engines, vol. 115-3, 2007.
- [22] I. Arsie, G. Rizzo, M. Sorrentino, “Optimal Design of a Hybrid Solar Vehicle”, AVEC’06, Taipei (TW), August 20-24, 2006.
- [23] G. Rizzo, M. Sorrentino, I. Arsie, “Rule-Based Optimization of Intermittent ICE Scheduling on a Hybrid Solar Vehicle”, 9th International Conference on Engines and Vehicles ICE 2009, September 14-17, Capri, Italy, Edited by:SAE International.
- [24] I. Arsie, G. Rizzo, M. Sorrentino, “Optimal Design and Dynamic Simulation of a Hybrid Solar Vehicle”, SAE TRANSACTIONS - JOURNAL OF ENGINES 115-3: 805-811.
- [25] G. Coraggio, C. Pisanti, G. Rizzo, M. Sorrentino, “Experimental validation of an heuristic strategy to optimize on-board energy management of a hybrid solar vehicle”, Les Rencontres Scientifiques d’IFP Energies nouvelles, Rueil-Malmaison, France, 6 - 7 December 2011.
- [26] J. Moreno, M. E. Ortuzar, J. W. Dixon, “Energy-Management System for a Hybrid Electric Vehicle, Using Ultracapacitors and Neural Networks”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53-2, pp. 614.623.
- [27] <http://www.domusenergy.it>
- [28] <http://www.edeamicis.com>
- [29] <http://www.energethics.it>
- [30] Quaschnig V. (2003), "Technology fundamentals - The sun as an energy resource". Renewable Energy World 6 (5): 90–93.
- [31] <http://www.vialattea.net>
- [32] <http://www.nrel.gov/rredc>
- [33] C. Pisanti, Tesi di laurea, “Sviluppo di un modello matematico per un tetto solare mobile per un veicolo ibrido solare”, 2008.

- [34]G. Coraggio, Tesi di laurea, “Progettazione di un tetto solare mobile per un veicolo ibrido solare”, 2008.
- [35]G. Legnani, “Robotica industriale”, Case Editrice Ambrosiana.
- [36]D. Zhang, “Parallel Robotic Machine Tools”, Springer.
- [37]<http://www.solidworks.it>
- [38]<http://www.mathworks.it/products/matlab>
- [39]S. Fiore, Tesi di laurea, “Stima delle dissipazioni per attrito in meccanismi spaziali mediante MATLAB/SimMechanics”, 2010.
- [40]G. Coraggio, C. Pisanti, G. Rizzo, A. Senatore (2010) , “A Moving Solar Roof for a Hybrid Solar Vehicle”, In: 6th IFAC Symposium "Advances in Automotive Control", AAC10, July 11-14, 2010, Munich (Germany).
- [41]G. Coraggio, C. Pisanti, G. Rizzo, A. Senatore (2010), “Model Based Control of a Moving Solar Roof for a Solar Vehicle”, In: 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC10, August 22-26 2010, Loughborough, UK.
- [42]G. Coraggio, C. Pisanti, G. Rizzo, A. Senatore (2011), “Design and Control of a Mobile Solar Roof for a Solar Vehicle”, In: Proceedings of ICE2011Conference, September 12-15, 2011, Capri, Italy SAE International - 2011-24-0072.
- [43]<http://www.edmundoptics.com/>
- [44]G. Galano, Tesi di laurea, “Studio ed implementazione di un sistema di controllo per un tetto solare mobile per un autoveicolo”, 2011.
- [45]Chong Hui Kim, Byung Kook Kim, “Minimum-energy translational trajectory generation for differential-driven wheeled mobile robots”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 49, no.4, pp. 367-383, August 2007.
- [46]E.S. Sergaki, , G.S. Stavrakakis, A.D. Pouliezios, “Optimal robot speed trajectory by minimization of the actuator motor electromechanical losses”, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 33, No. 2, pp. 187-207, ISSN 0921-0296, 2002.

RINGRAZIAMENTI

Grazie a tutte le persone della mia vita che l'hanno resa migliore con una parola, un sorriso, un dono, una gentilezza, un esempio ...

- ✓ *Il mio primo pensiero, ovviamente, va ai miei genitori, senza il loro aiuto non avrei mai raggiunto quest'altra meta. Ad essi vanno tutta la mia stima, il mio rispetto e la mia riconoscenza. Li ringrazio soprattutto perché sono, e continueranno ad essere, un esempio e il mio principale punto di riferimento per tutti i traguardi che ho raggiunto e che, mi auguro, raggiungerò.*
- ✓ *Giuseppe e Lucia perché so che potrò sempre contare su di loro.*
- ✓ *Quanto alla persona che ha ricevuto la dedica ufficiale ritengo che a quest'ultima ben poco si possa aggiungere, se non il ringraziamento per tutto ciò che mi ha insegnato sulla vita e non, per la persona che è e per ciò che sono io quando sto con lei. Grazie con tutto il cuore, di tutto quello che hai fatto per me, ma soprattutto grazie per avermi fatto capire che valeva la pena farlo per me.*
- ✓ *Raffaele e Lina per il continuo sostegno e incitamento a dare il massimo.*
- ✓ *Prof. Gianfranco Rizzo, per la fiducia fin da subito dimostratami e per aver creduto nelle mie capacità. I miei più sentiti ringraziamenti anche per avermi seguito da vicino durante questo periodo di studio. Per i piccoli traguardi raggiunti in questo triennio e per le esperienze che senza di lui non avrei intrapreso. Motivo di orgoglio è l'aver lavorato con una persona come lui.*
- ✓ *Prof. Adolfo Senatore per la continua disponibilità e prontezza nei chiarimenti e suggerimenti. Per avermi aiutato ogni volta ad intraprendere scelte appropriate. Per avermi dato la possibilità di lavorare con uno dei migliori docenti del nostro dipartimento.*
- ✓ *Desidero ringraziare tutte quelle persone con cui ho iniziato e trascorso questi tre anni: Angelo, Dario, Giampaolo, Giulio, Ivan, Pierpaolo, Raffaele e Silvana, con cui ho scambiato qualche pensiero, qualche idea ma soprattutto con cui ho condiviso tante risate e tanti momenti indimenticabili, all'interno, e fuori, dal laboratorio I5.*