



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica

XIV Ciclo N.S. (2013-2015)

*“Caratterizzazione termo-fluidodinamica ed ottimizzazione
delle prestazioni di un prototipo di refrigeratore magnetico a
magneti permanenti rotanti operante a temperatura
ambiente”*

Ing. Gerardo Cardillo

Il Tutor

Ch.mo Prof. Ciro Aprea

Co-Tutor

Prof. Angelo Maiorino

Il Coordinatore

Ch.mo Prof. Vincenzo Sergi

Alla mia famiglia

A mia moglie

Al futuro

Sommario

INDICE DELLE FIGURE	IV
INDICE DELLE TABELLE	10
INTRODUZIONE	12
1.CAPITOLO 1: INTRODUZIONE ALLA REFRIGERAZIONE MAGNETICA	15
1.1 Le sostanze magnetiche	15
1.2 Classificazione delle sostanze magnetiche	18
1.2.1. Sostanze diamagnetiche	19
1.2.2. Sostanze paramagnetiche	21
1.2.3. Sostanze ferromagnetiche	24
1.3 Termodinamica dei sistemi magnetici	27
1.4 Trasformazioni termodinamiche fondamentali relative ai sistemi magnetici	31
1.4.1. Trasformazione isoterma	31
1.4.2. Trasformazione adiabatica	33
1.4.3. Trasformazione isocampo	35
1.4.4. Trasformazione isomagnetica	37
1.5 L'effetto magnetocalorico e la refrigerazione magnetica	38
1.6 Cicli di riferimento nella refrigerazione magnetica e parametri caratteristici	43
1.6.1. Il ciclo magnetico inverso di Brayton	43

Indice	II
1.6.2. Il ciclo AMR	46
2.CAPITOLO 2: IL PROTOTIPO DI REFRIGERATORE MAGNETICO A MAGNETI PERMANENTI ROTANTI	50
2.1 Gruppi magnetici	50
2.2 Sistema idraulico	54
2.3 Il rigeneratore e il Materiale Magnetocalorico (MCM)	58
2.4 Il sistema di movimentazione dei magneti	59
3.CAPITOLO 3: CAMPAGNA PROVE SPERIMENTALI	61
3.1 Misura diretta e indiretta delle grandezze fisiche	61
3.2 Il sistema di acquisizione e controllo	66
3.3 Risultati sperimentali	68
3.4 Diagramma delle pressioni e Utilization Factor	70
3.5 Temperature span e fattore di rigenerazione	72
3.6 I volumi morti	73
3.7 Analisi della coppia e introduzione del PVP (Paramagnetic Volume Percentage)	75
3.8 Curve parametriche: influenza del carico frigorifero sul temperature span	80
3.9 Analisi del temperature span in funzione del carico frigorifero	84
3.10 Analisi del COP	89
3.10.1. Andamento del COP in funzione del ΔT_{span} con Φ fissato e diverse coppie ($V_{p,n}$)	90

3.10.2. Andamento del COP in funzione di T_H con portata e frequenza ciclo fissata	91
3.10.3. Analisi del COP in funzione del carico frigorifero	93
4.CAPITOLO 4: OTTIMIZZAZIONE DEL RIGENERATORE	95
4.1 Analisi degli ingombri	96
4.2 Analisi strutturale	98
4.2.1. Analisi del solo coperchio	99
4.2.2. Analisi della base	102
4.3 Analisi fluidodinamica	104
4.3.1. Mezzi porosi	104
4.3.2. Risultati della simulazione	106
CONCLUSIONI	109
RINGRAZIAMENTI	112
BIBLIOGRAFIA	113

Indice delle figure

Figura 1 - Rappresentazione dei due movimenti dell'elettrone: uno orbitale intorno al nucleo e uno di spin su se stesso _____	15
Figura 2 - Semplice modello di momento dipolare magnetico orbitale. Un materiale magnetico può essere considerato come un insieme di momenti di dipolo magnetico, ciascuno coi suoi poli nord e sud. Microscopicamente, ciascun dipolo è in realtà una spira di corren	17
Figura 3 - Andamento della suscettività magnetica rispetto al campo esterno nelle sostanze diamagnetiche _____	20
Figura 4 - Andamento dell'induzione magnetica rispetto al campo esterno nelle sostanze diamagnetiche _____	20
Figura 5 - Andamento della magnetizzazione rispetto al campo esterno nelle sostanze diamagnetiche _____	21
Figura 6 - Disposizione casuale dei dipoli magnetici in una sostanza paramagnetica in assenza di campo esterno _____	21
Figura 7 - Disposizione ordinata dei dipoli magnetici di una sostanza magnetica in presenza di un campo esterno _____	22
Figura 8 - Andamento della magnetizzazione rispetto al campo esterno nelle sostanze paramagnetiche _____	22
Figura 9 - Andamento dell'induzione del campo magnetico rispetto al campo esterno nelle sostanze diamagnetiche _____	23
Figura 10 - Andamento della suscettività rispetto alla temperatura nelle sostanze paramagnetiche _____	23
Figura 11 - Andamento della suscettività magnetica rispetto all'intensità del campo esterno al variare della temperatura nelle sostanze ferromagnetiche _____	25
Figura 12 - Andamento della magnetizzazione e dell'induzione magnetica in funzione del campo magnetico esterno e della temperatura per un materiale ferromagnetico. _____	25
Figura 13 - Ciclo di isteresi caratteristico delle sostanze ferromagnetiche [31] _____	26

Figura 14 - Andamento della suscettività rispetto alla temperatura a campo costante nelle sostanze ferromagnetiche _____	27
Figura 15 - Andamento dell'entropia vibrazionale (S_L), elettronica (S_E) e magnetica (S_M) in funzione della temperatura e del campo magnetico per una sostanza magnetica _____	28
Figura 16 - Andamento della capacità termica rispetto alla temperatura per valori crescenti del campo magnetico per una lega di $Gd_5Si_{2.09}Ge_{1.91}$ _____	30
Figura 17 - Trasformazione isoterma per una sostanza paramagnetica o ferromagnetica con $H_1 > H_2$ _____	32
Figura 18 - Trasformazione adiabatica per una sostanza paramagnetica o ferromagnetica con $H_1 > H_2$ _____	34
Figura 19 - Trasformazione isocampo per una sostanza ferromagnetica o paramagnetica _____	35
Figura 20 - Rappresentazione dell'effetto magnetocalorico _____	38
Figura 21 - Rappresentazione dell'effetto magnetocalorico per una sostanza ferromagnetica _____	39
Figura 22 - Organizzazione dei dipoli magnetici di una sostanza ferromagnetica prima e dopo l'applicazione di un campo magnetico esterno nel caso di un processo isoterma [20] _____	40
Figura 23 - Organizzazione dei dipoli magnetici di una sostanza ferromagnetica prima e dopo l'applicazione di un campo magnetico esterno nel caso di un processo adiabatico _____	41
Figura 24 - Il ΔS_M per il gadolinio Gd per una variazione del campo magnetico da 0 a 5 T ricavato da dati sperimentali della capacità termica. Le curve a punti rappresentano l'intervallo dell'errore assoluto [35]. _____	42
Figura 25 - Il ΔT_{ad} per il gadolinio Gd per una variazione del campo magnetico da 0 a 5 T ricavato da dati sperimentali della capacità termica. Le curve a punti rappresentano l'intervallo dell'errore assoluto [35]. _____	43
Figura 26 - Rappresentazione del ciclo Brayton o Joule nel piano T-s _	44

Figura 27 - Ciclo Brayton o Joule inverso in un piano e ciclo Brayton magnetico nel piano T-s _____	44
Figura 28 -Salto termico ottenibile mediante un ciclo Brayton non rigenerativo _____	46
Figura 29 - Schema di un refrigeratore magnetico AMR _____	47
Figura 30 - Fase di magnetizzazione adiabatica di un ciclo AMR _____	47
Figura 31 - Fase di raffreddamento isocampo nel ciclo AMR _____	48
Figura 32 - Fase di demagnetizzazione adiabatica nel ciclo AMR _____	48
Figura 33 - Fase di riscaldamento isocampo nel ciclo AMR _____	49
Figura 34 – Rappresentazione dello “stiramento” tipico di un ciclo rigenerativo AMR sul piano T-s _____	49
Figura 35 - Vista laterale del sistema magnetico e della valvola rotante	50
Figura 36 - (a) Dettaglio di 8Mag: 1) magneti permanenti; 2) supporto dei magneti; 3) valvola rotante; 4) rigeneratore; 5) supporto dei rigeneratori; 6) collettore da/verso i rigeneratori; 7) collettore da/verso gli scambiatori; 8) cuscinetti; 9) ghiera di regolazione. (b) Sezione longitudinale (A-A) e assiale (B-B) della macchina _____	51
Figura 37 - Sezione longitudinale della configurazione Halbach array adottata in 8Mag _____	52
Figura 38 - (a). Misura dell'induzione magnetica in funzione dell'angolo di rotazione in tre differenti posizioni radiali: hot end (200mm), middle end (177.5 mm), cold end (155 mm). (b) Induzione magnetica in funzione della posizione radiale per tre differenti posizioni angolari: 0°, 45° e 90° _____	53
Figura 39 - Schema di funzionamento della valvola rotante dell'8MAG in una determinata posizione di riferimento _____	55
Figura 40 - Schema del circuito idraulico equivalente dell'8MAG _____	56
Figura 41 - Particolare del prototipo 8Mag con evidenza degli scambiatori di calore lato caldo e lato freddo _____	58
Figura 42 - Dettagli di un rigeneratore: 1) Guscio, 2) Diffusori, 3) MCM, 4) Attacco rapido filettato _____	59
Figura 43 - Schema elementare dell'impianto sperimentale _____	63

Figura 44 - (a) Schema elettrico del collegamento tra Arduino e gli ingressi dell'inverter; (b) schema elettrico dei possibili collegamenti dell'inverter (manuale d'uso)	67
Figura 45 - (a) Finestra principale del progetto realizzato in Labview; (b) codice di calcolo del main del progetto	67
Figura 46 - (a) Particolare dell'interfaccia grafica del controllo della pompa e del motore del magnete; (b) particolare dell'interfaccia grafica di visualizzazione dei dati acquisiti	68
Figura 47 - Misura delle pressioni agli estremi di un rigeneratore in funzione dell'angolo di rotazione ($V_p = 7 \text{ l min}^{-1}$ - $f_{AMR} = 0.71 \text{ Hz}$)	71
Figura 48 - Fattore di rigenerazione in funzione dell'utilisation factor per differenti temperature della sorgente calda con portata pari a 7 l min^{-1}	72
Figura 49 - ΔT_{AMR} in funzione dell'utilisation factor per diverse temperature della sorgente calda con portata pari a 7 l min^{-1}	73
Figura 50 - Profilo di temperatura e pressione ($f_{AMR}=0.9 \text{ Hz}$, $V_p=7 \text{ l min}^{-1}$ e T_h pari a 25°C)	75
Figura 51 - a) Coppia media al variare della frequenza AMR parametrizzata per T_h Q_f nullo, 7 l min^{-1} ; b) Coppia media al variare di T_h parametrizzata della frequenza AMR, Q_f nullo, 7 l min^{-1} .	76
Figura 52 - Correlazione tra il PVP e la variazione della coppia	78
Figura 53 - Effetto del PVP sul ΔT_{span}	79
Figura 54 - Temperature span in funzione di T_h per 0, 56 e 100W. Test eseguito a 0.77 Hz e utilization 0.86	81
Figura 55 - Temperature span in funzione dell'utilisation factor al variare del carico frigorifero	81
Figura 56 - (a,b,c) ΔT_{span} in funzione di f_{AMR} per differenti carichi frigoriferi e differenti portate d fluido	82
Figura 57 - (a,b,c) ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero per differenti frequenze ciclo e portate con $T_H=23^\circ\text{C}$	86

Figura 58 - ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero per tre differenti coppie portata-frequenza ciclo che diano lo stesso Φ uguale a 1.76	88
Figura 59 - (a,b,c,d,) ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero per tre differenti coppie portata-frequenza ciclo che diano lo stesso Φ (2.65, 1.32, 0.88, 0.53)	89
Figura 60 - (a,b,c,d,e) COP in funzione del temperature span per tre diversi utilization factor, ognuno ottenuto con tre diverse coppie di portata e frequenza ciclo	91
Figura 61 - Andamento del COP in funzione del temperature span con Φ fissato pari a 1.32-(7,0.72) per diversi valori di T_H	93
Figura 62 - COP in funzione del carico frigorifero per tre differenti coppie portata-frequenza ciclo corrispondenti allo stesso utilization factor ($\Phi=1.76$)	94
Figura 63 - (a) Disegno CAD del nuovo rigeneratore; (b) particolare dei due flussi unidirezionali di fluido del ciclo Brayton; (c) particolare delle micro-valvole unidirezionali.	96
Figura 64 - Analisi degli ingombri del nuovo rigeneratore e del circuito idraulico	97
Figura 65 - Differenza tra il vecchio rigeneratore (a sinistra) e il nuovo ottimizzato (a destra)	98
Figura 66 - Condizioni al contorno al problema simmetrico di analisi strutturale del coperchio	100
Figura 67 - Acciaio 316L: Analisi della tensione dell'interno coperchio (a destra) e del solo dominio di applicazione del carico (a sinistra) per una pressione impostata di 10 bar.	101
Figura 68 - Acciaio 316L: Analisi della deformazione dell'interno coperchio con una pressione applicata di 10 bar.	101
Figura 69 - Tecanat GF30 : Analisi della tensione del solo dominio di applicazione del carico (a sinistra) e della deformazione (a destra) per una pressione impostata di 10 bar.	102

Figura 70 - Tecamid GF30 : Analisi della tensione del solo dominio di applicazione del carico (a sinistra) e della deformazione (a destra) per una pressione impostata di 10 bar. _____	102
Figura 71 - (a) Sollecitazioni della base del rigeneratore in: (a) Tecanat GF 30, (b) Tecamid GF 30, (c) PA6 (Ansys 14.0) _____	103
Figura 72 - Ottimizzazione del rigeneratore: modello definitivo _____	103
Figura 73 - Rilievo sperimentale delle caratteristiche del MCM inteso come mezzo poroso _____	107

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Trasformazione isoterma di una sostanza magnetica: variazione della suscettività _____	33
Tabella 2 - Confronto tra diversi progetti di magneti utilizzati nella refrigerazione magnetica _____	54
Tabella 3 - Dati del motore e del riduttore _____	60
Tabella 4 - Caratteristica dei sensori utilizzati e accuratezza delle misure dirette e indirette _____	66
Tabella 5 - Relazione tra i volumi morti e il massimo ΔT_{span} . Temperature della sorgente calda pari a 29°C _____	74
Tabella 6 - Relazione tra i volumi morti e il massimo ΔT_{span} . Temperature della sorgente calda pari a 23° _____	74
Tabella 7 - Sommario di alcuni prototipi di refrigeratore magnetico presenti in letteratura _____	80
Tabella 8 - Valori del temperature span al variare della frequenza e del carico frigorifero. $V_p=5 \text{ l min}^{-1}$, $T_H=23^\circ\text{C}$ _____	83
Tabella 9 - Valori del temperature span al variare della frequenza e del carico frigorifero. $V_p=6 \text{ l min}^{-1}$, $T_H=23^\circ\text{C}$ _____	83
Tabella 10 - Valori del temperature span al variare della frequenza e del carico frigorifero. $V_p=7 \text{ l min}^{-1}$, $T_H=23^\circ\text{C}$ _____	84
Tabella 11 - Valori del temperature ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero con $f_{\text{AMR}}=0.26\text{Hz}$ e $T_H=23^\circ\text{C}$ _____	84
Tabella 12 - Valori del temperature ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero con $f_{\text{AMR}}=0.38\text{Hz}$ e $T_H=23^\circ\text{C}$ _____	85
Tabella 13 - Valori del temperature spa ΔT_{span} n in funzione del carico frigorifero con $f_{\text{AMR}}=0.51\text{Hz}$ e $T_H=23^\circ\text{C}$ _____	85
Tabella 14 - Valori del temperature ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero con $f_{\text{AMR}}=0.77\text{Hz}$ e $T_H=23^\circ\text{C}$ _____	85
Tabella 15 - Valori del temperature ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero con $f_{\text{AMR}}=1.28\text{Hz}$ e $T_H=23^\circ\text{C}$ _____	85
Tabella 16 - Valori del COP in funzione del Δt_{span} con $\Phi=1.76$ (5,0.38) e $T_H=23^\circ\text{C}$ _____	87

Tabella 17 - Valori del COP in funzione del Δt_{span} con $\Phi=1.76$ (6,0.46) e $T_H=23^\circ\text{C}$	87
Tabella 18 - Valori del COP in funzione del Δt_{span} con $\Phi=1.76$ (7,0.54) e $T_H=23^\circ\text{C}$	88
Tabella 19 - Valori del COP in funzione di ΔT_{span} con $\Phi=1.32$ (7,0.72) e $T_H=16^\circ\text{C}$	92
Tabella 20 - Valori del COP in funzione di ΔT_{span} con $\Phi=1.32$ (7,0.72) e $T_H=23^\circ\text{C}$	92
Tabella 21 - Valori del COP in funzione di ΔT_{span} con $\Phi=1.32$ (7,0.72) e $T_H=32^\circ\text{C}$	92
Tabella 22 - Materiali impiegati per la simulazione strutturale del nuovo rigeneratore	99

Introduzione

La refrigerazione a temperatura ambiente, come ad esempio la climatizzazione nelle nostre case, scuole e auto con impianti split o con gruppi frigoriferi, si basa su una tecnologia ormai matura e con limitate possibilità di evoluzione: la compressione di vapore. La principale ricerca che si svolge su questa tecnologia è l'individuazione di fluidi frigoriferi che non risultino dannosi per l'uomo o per l'ambiente. I recenti trattati internazionali, infatti, hanno imposto alle case costruttrici di sostituire il gas utilizzato con altri non dannosi per lo strato di ozono e che limitino l'impatto sul riscaldamento globale. Tali limiti, per la natura intrinseca di tale tecnologia, almeno per ora non è possibile superarli del tutto.

Una valida alternativa alla su citata compressione di vapore è la refrigerazione magnetica. Quest'ultima si basa sull'effetto magneto-calorico e l'utilizzo di un solido come refrigerante.

L'effetto magneto-calorico può essere definito come la capacità di una sostanza solida (paramagnetica o ferromagnetica) di riscaldarsi se magnetizzata e di raffreddarsi con la rimozione del campo magnetico esterno. In tal senso, l'effetto magneto-calorico può essere definito come una variazione adiabatica di temperatura dovuta alla magnetizzazione/demagnetizzazione del materiale.

Utilizzando tale proprietà in un ciclo termodinamico (complesso): il ciclo Brayton, si ottiene il principio di funzionamento di un prototipo di refrigeratore magnetico. Una differenza sostanziale tra i sistemi classici e quelli magnetici si riscontra nella sostanza refrigerante, infatti per i primi essa è un fluido, mentre per i secondi è un solido, che è caratterizzato da una pressione costante lungo tutto il ciclo. Per questo motivo, i processi isobari di un ciclo a compressione di vapore sono sostituiti con delle trasformazioni con caratteristiche simili, nel caso specifico quelle a campo magnetico costante, mentre i processi isoentropici sono rappresentati da due trasformazioni adiabatiche: una magnetizzazione ed una demagnetizzazione.

In definitiva il ciclo magnetico inverso di Brayton è composto da quattro fasi: una magnetizzazione adiabatica, una sottrazione di calore a campo magnetico (non nullo) costante, una demagnetizzazione adiabatica e un'adduzione di calore: l'effetto frigorifero a campo magnetico nullo.

Rispetto alla compressione di vapore, la refrigerazione magnetica è una tecnologia a basso impatto ambientale, il refrigerante è un solido e il fluido di lavoro un liquido. Dunque non è rumorosa, le fonti di moto sono due: un motore elettrico per il moto del magnete (o del rigeneratore in funzione del prototipo) e un altro per la pompa, ha un Potenziale di Distruzione dell'Ozono (ODP) nullo e nessuno impatto diretto sul Riscaldamento Globale: GWP diretto nullo.

Un refrigeratore magnetico, seppur offrendo notevoli vantaggi in termini di impatto ambientale e spesa energetica, presenta un forte svantaggio legato al salto termico ottenibile. Quest'ultimo, infatti, risulta essere inferiore alla differenza di temperatura adiabatica; tale grandezza vale circa $3K/T$ per le sostanze magnetiche conosciute e dipende dall'intensità del campo magnetico esterno e dalla temperatura del materiale: il massimo si raggiunge quando il solido si trova alla temperatura di Curie.

Per superare i limiti del ciclo magnetico inverso di Brayton, è possibile attuare il principio della rigenerazione, ottenendo così il cosiddetto ciclo Active Magnetic Regenerator (AMR) [12]. In tale ciclo la sostanza magnetica funge non solo da refrigerante, fornendo una variazione di temperatura a fronte di una magnetizzazione o demagnetizzazione, ma anche come rigeneratore per un fluido, detto rigenerante, in grado di trasferire energia termica.

Il ciclo AMR consiste nelle stesse trasformazioni di quello non rigenerativo [16],[24],[27],[38], ma è caratterizzato dal fatto che la sostanza refrigerante, che costituisce il rigeneratore, è in grado di essere attraversata dal fluido rigenerante, il quale la associa con gli scambiatori di calore della sorgente calda e fredda. Il rigeneratore, quindi, è immerso nel flusso del fluido rigenerante che, mediante pistoni o pompe, si può muovere attraverso di esso.

Dal 1976, anno in cui Brown costruì il primo refrigeratore magnetico operante a temperatura ambiente, sono state realizzati diversi apparati sperimentali che si differenziano per le configurazioni e le soluzioni tecniche adoperate.

La letteratura fornisce una classificazione di questi ultimi in due categorie [47]: la prima che va dal 1976 al 2001 ed è caratterizzata dall'applicazione di magneti superconduttori e da basse frequenze di lavoro; la seconda, il cui inizio viene fatto coincidere con la presentazione del prototipo dell' Astronautics Corporation of America avvenuta, per

l'appunto, nel 2001, che presenta l'utilizzo di nuovi materiali magnetocalorici, alte frequenze di lavoro, magneti permanenti e macchine rotative, non solo alternative.

In aggiunta a queste due, successivamente è stata introdotta un'altra categoria, dovuta alla presentazione di un nuovo prototipo realizzato da Zimm nel 2007, che presenta un raddoppio del numero di magneti, i quali ruotano a rigeneratori fermi, ed una configurazione ad array di Halbach.

All'ultima categoria su citata appartiene il prototipo di refrigeratore magnetico realizzato presso il Laboratorio di Tecnica del Freddo dell'Università degli Studi di Salerno. Questo, infatti, è costituito da due magneti permanenti rotanti ad Halbach array, i quali magnetizzano e demagnetizzano otto rigeneratori fissi durante il loro movimento: il nome *8MAG* deriva proprio dal numero di rigeneratori utilizzati nell'apparato e dalla sua forma ottagonale.

Il presente testo mostra il completamento e la caratterizzazione termo-fluidodinamica del prototipo suddetto.

Attraverso una esaustiva campagna prove e l'analisi dei dati sperimentali vengono individuate le condizioni di funzionamento ottimali nonché i limiti di tale tecnologia, di conseguenza vengono mostrate le proposte, anche strutturali, di ottimizzazione delle performance del prototipo oggetto di studio.

CAPITOLO 1: Introduzione alla Refrigerazione Magnetica

1.1 Le sostanze magnetiche

Nella nostra vita quotidiana facciamo largo uso di sostanze magnetiche; basti pensare, infatti, ai mezzi di registrazione come hard disk, alle carte di credito, ai televisori, ai microfoni e ai motori elettrici. In ogni applicazione viene utilizzato un tipo di materiale in grado di esercitare un campo magnetico permanente o che esso stesso possa “magnetizzarsi” e “demagnetizzarsi” con relativa facilità.

In generale, per *sostanza magnetica* si intende una qualsiasi sostanza che sia in grado di poter interagire con un campo magnetico esterno, indebolendolo o rafforzandolo.

Il comportamento di tali materiali può essere spiegato osservando ciò che succede al livello atomico di una generica sostanza.

In un modello classico dell'atomo ogni elettrone è dotato di due movimenti: una evoluzione orbitale attorno al nucleo di appartenenza e una rotazione sul proprio asse, ai quali è associabile, rispettivamente, un vettore momento dipolare magnetico orbitale \vec{m}_L e uno di spin \vec{m}_s (Figura 1)

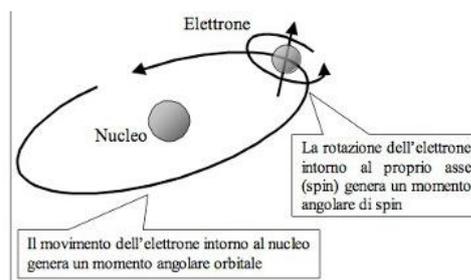


Figura 1 - Rappresentazione dei due movimenti dell'elettrone: uno orbitale intorno al nucleo e uno di spin su se stesso

Le proprie magnetiche di un materiale sono determinate dal momento di dipolo magnetico totale dei suoi atomi m , ottenuto dalla somma vettoriale della parte orbitale e della parte di spin.

Per quanto riguarda il primo movimento si pensi a un modello semplice in cui l'elettrone ruota in un'orbita circolare di raggio r intorno al nucleo con una velocità costante w ; ricordando dalla fisica il campo prodotto da una spira circolare percorsa da corrente, associando ad esso una corrente equivalente pari a:

$$i = \frac{-e}{T} = \frac{-e\omega}{2\pi} = \frac{-ew}{2\pi r} \quad 1$$

dove T è il periodo dell'orbita ed $-e$ è la carica dell'elettrone¹, è possibile definire, quindi, il *momento magnetico* \vec{m}_L della molecola come il prodotto tra la corrente i , associata al moto orbitale dell'elettrone, e l'area A racchiusa dall'orbita.

$$\vec{m}_L = iA = \frac{-ew}{2\pi r} \pi r^2 = -\frac{1}{2} ewr \hat{u}_n \quad 2$$

Il termine \hat{u}_n indica il verso e la direzione del vettore: l'orientazione sarà perpendicolare al piano della spira con verso determinato dalla regola della mano destra.

Prendendo in considerazione il *momento angolare orbitale* \vec{L} , che per l'elettrone vale:

$$\vec{L} = (m_e wr) \hat{u}_n \quad 3$$

con m_e che rappresenta la massa dell'elettrone, ed andando a sostituire nell'equazione precedente, si ottiene:

$$\vec{m}_L = \left(\frac{-e}{2m_e} \right) \vec{L} \quad 4$$

Da questo risultato si evince che il momento magnetico dell'elettrone è proporzionale al suo momento angolare orbitale, ed, inoltre, che i due vettori sono antiparalleli, per la presenza del segno negativo della carica dell'elettrone.

Oltre al momento angolare orbitale, esiste un'altra causa di momento magnetico a livello atomico. L'elettrone, infatti, possiede un momento angolare intrinseco, a cui si associa un momento magnetico intrinseco \vec{m}_s , relativo alla rotazione della particella intorno al proprio asse (*momento angolare di spin*).

¹ La carica dell'elettrone è pari a $-1.602176565 \cdot 10^{-19} \text{C}$.

La relazione vettoriale che intercorre tra il momento magnetico intrinseco e il momento angolare di spin è:

$$\vec{m}_s = -\frac{e}{m_e} \vec{s} \quad 5$$

dove \vec{s} rappresenta proprio quest'ultimo.

Per quanto detto, è possibile considerare una sostanza magnetica come un insieme di piccoli dipoli magnetici che in assenza di un campo magnetico esterno sono disposti in modo caotico, ma che tendono ad orientarsi in maniera più o meno ordinata al sorgere di tale forzante esterna.

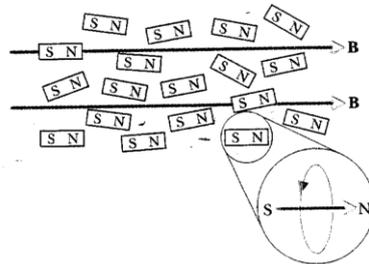


Figura 2 - Semplice modello di momento dipolare magnetico orbitale. Un materiale magnetico può essere considerato come un insieme di momenti di dipolo magnetico, ciascuno coi suoi poli nord e sud. Microscopicamente, ciascun dipolo è in realtà una spirale di corren

Questa configurazione corrisponde allo stato di sostanza magnetizzata, il quale è contraddistinto dall'insorgere di una intensità supplementare H' del campo magnetico, che si somma a quella originale H , originando il cosiddetto *campo di induzione magnetica B*, misurato in tesla (T):

$$B = H + H' \quad 6$$

L'intensità supplementare può essere espressa come:

$$H' = 4\pi\vec{M} \quad 7$$

laddove \vec{M} è il momento magnetico per unità di volume della sostanza ed è così definito:

$$\vec{M} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{V} \quad 8$$

dove m_i è il momento magnetico dell' i -esima molecola della sostanza contenuta nel volume V .

A questo punto è possibile considerare il legame che intercorre tra il campo magnetico esterno e la magnetizzazione M , precedentemente definita, dato dalla seguente relazione:

$$M = \chi(T, H) * H \quad 9$$

dove χ rappresenta la *suscettività magnetica* del materiale, la quale è

una caratteristica di ogni sostanza e può essere costante o variabile rispetto alla temperatura oppure rispetto all'intensità del campo magnetico esterno. Questa grandezza esprime il grado con cui un solido risponde all'azione di un campo magnetico esterno.

In particolare, tale variabile è interpretabile come la pendenza della curva di magnetizzazione rispetto all'intensità del campo esterno a temperatura costante, cioè:

$$\chi = \left(\frac{\partial M}{\partial H} \right)_T \quad 10$$

A questo punto, si può considerare la relazione tra la suscettività magnetica e l'intensità supplementare di campo magnetico H' , data da:

$$H' = 4\pi M \quad 11$$

Quest'ultima permette di riscrivere la formulazione dell'induzione del campo magnetico B :

$$B = H + 4\pi M = H + 4\pi\chi H = (1 + 4\pi\chi)H \quad 12$$

Ponendo successivamente

$$\mu = 1 + 4\pi\chi \quad 13$$

è possibile ottenere la relazione tra il campo di induzione magnetica ed il campo esterno:

$$B = \mu H \quad 14$$

dove μ rappresenta la *permeabilità magnetica del mezzo*², una grandezza fisica che esprime l'attitudine del materiale a magnetizzarsi in presenza di un campo magnetico esterno.

1.2 Classificazione delle sostanze magnetiche

Il paragrafo precedente ha descritto i principali parametri che caratterizzano le sostanze magnetiche, le quali, in natura, presentano diversi comportamenti, a seconda di come reagiscono nei confronti di un campo magnetico esterno. La variabile che indica il grado di tale reazione è la suscettività magnetica χ , in base alla quale è possibile suddividere le sostanze magnetiche in tre categorie principali: diamagnetiche,

² Spesso la permeabilità magnetica si esprime come prodotto tra la permeabilità magnetica nel vuoto e la permeabilità magnetica relativa del materiale: $\mu = \mu_0\mu_r$, dove la prima è una costante fondamentale della fisica ed è pari a $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

paramagnetiche e ferromagnetiche.

1.2.1. Sostanze diamagnetiche

Il fenomeno del diamagnetismo è causato dalla tendenza delle cariche elettriche a schermare in parte un corpo dall'azione di un campo magnetico esterno. Tutte le sostanze sono caratterizzate da questa caratteristica: il comportamento diamagnetico si manifesta per quei materiali per cui tale effetto è preponderante rispetto ad altri.

Esempi di sostanze diamagnetiche sono i gas nobili allo stato solido, che presentano un otetto completo come l'elio (*He*), il neon (*Ne*), l'argon (*Ar*), il kripton (*Kr*) e lo xenon (*Xe*), oppure dei composti ionici come il fluoruro di litio, il fluoruro di potassio ed il fluoruro di sodio. Inoltre, sia l'atomo di fluoro (l'alogeno) acquistando un elettrone che i metalli alcalini (*Li*, *K*, *Na*) perdendone uno hanno un comportamento diamagnetico, in quanto ionizzandosi realizzano la condizione che caratterizza i gas nobili. I materiali diamagnetici, quindi, sono composti da atomi privi di un momento magnetico netto, in quanto i loro elettroni sono disposti in orbitali senza elettroni spaiati.

La suscettività magnetica delle sostanze diamagnetiche è sempre negativa ($\chi < 0$) e non dipende dall'intensità del campo esterno H (Figura 3), così come dalla temperatura³, anche se esistono alcune eccezioni. Ciò comporta che l'induzione del campo magnetico B sia minore dell'intensità del campo magnetico esterno, in quanto se χ è negativa, allora la permeabilità magnetica μ è minore di uno, dunque moltiplicando l'intensità del campo esterno con quest'ultimo fattore, si ottiene un valore dell'induzione magnetica più piccolo rispetto a quello del campo magnetico originale ($B < H$) (Figura 4). Dal punto di vista microscopico, ciò è dovuto al fatto che gli atomi delle sostanze diamagnetiche hanno un momento magnetico diretto sempre in verso opposto al campo magnetico esterno.

³ Quanto detto deriva dalla teoria classica del diamagnetismo di Langevin, che porta al seguente risultato:

$$\chi = \frac{M}{H} = -\frac{N Z e^2}{V 6 m c^2} \langle r^2 \rangle$$

da cui si evidenzia l'indipendenza dalla temperatura e dall'intensità del campo esterno, oltre alla negatività dell'indice in questione data dal segno meno al secondo membro, caratterizzato da variabili positive.

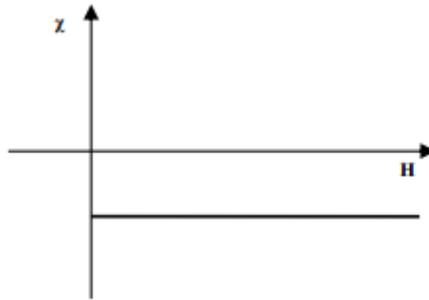


Figura 3 - Andamento della suscettività magnetica rispetto al campo esterno nelle sostanze diamagnetiche

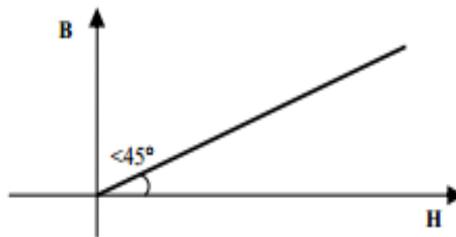


Figura 4 - Andamento dell'induzione magnetica rispetto al campo esterno nelle sostanze diamagnetiche

Il fatto che la suscettività magnetica sia sempre negativa, implica anche che la magnetizzazione sarà decrescente all'aumentare di H , in quanto, come visto nel paragrafo precedente, tale grandezza può essere vista come la pendenza della curva di magnetizzazione rispetto all'intensità del campo esterno (Figura 5).

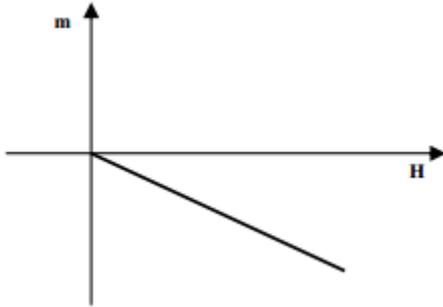


Figura 5 - Andamento della magnetizzazione rispetto al campo esterno nelle sostanze diamagnetiche

1.2.2. Sostanze paramagnetiche

Vengono chiamati materiali paramagnetici quelli che vengono risucchiati dal campo magnetico verso la regione di campo più intenso e che hanno la capacità di attirare verso di sé le linee di forza del campo (cioè di produrre una intensificazione dello stesso).

In assenza di un'intensità di campo magnetico esterno ($H=0$), la disposizione dei dipoli di tale sostanza è del tutto casuale, e tale da conferire un momento magnetico globalmente nullo.

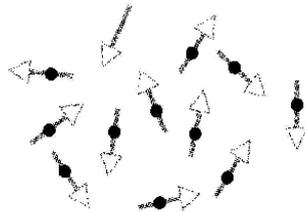


Figura 6 - Disposizione casuale dei dipoli magnetici in una sostanza paramagnetica in assenza di campo esterno

In presenza di un campo magnetico esterno ($H>0$), invece, i dipoli tendono ad orientarsi in maniera ordinata nello stesso verso del campo esterno: il materiale si magnetizza nella stessa direzione del campo, provocandone un rafforzamento.

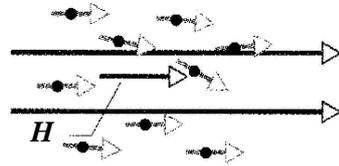


Figura 7 - Disposizione ordinata dei dipoli magnetici di una sostanza magnetica in presenza di un campo esterno

Tale fenomeno è comunque debole e svanisce non appena il campo magnetico esterno viene allontanato. In tali materiali è comunque presente il fenomeno del diamagnetismo, ma il suo effetto non si nota in quanto prevale quello del paramagnetismo.

Le sostanze in questione, quindi, sono caratterizzate da una relazione lineare, direttamente proporzionale tra M ed H (Figura 8): presentano una suscettività magnetica sempre positiva ($\chi > 0$) ed indipendente da H nella maggior parte dei casi.

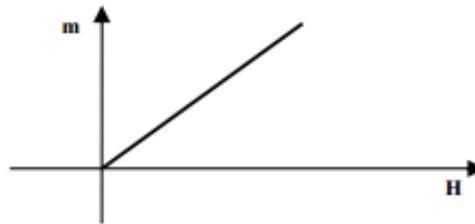


Figura 8 - Andamento della magnetizzazione rispetto al campo esterno nelle sostanze paramagnetiche

Il fatto che $\chi > 0$ implica che la permeabilità magnetica μ sia maggiore di uno, dunque il valore dell'induzione del campo magnetico sarà maggiore di quello dell'intensità del campo esterno, e ciò a conferma del rafforzamento del campo ($B > H$) (Figura 9).

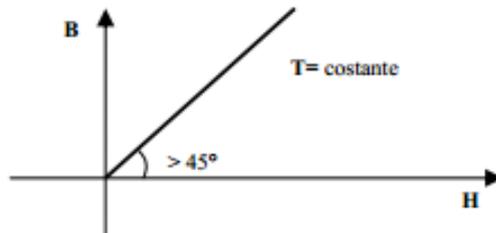


Figura 9 - Andamento dell'induzione del campo magnetico rispetto al campo esterno nelle sostanze diamagnetiche

A differenza delle sostanze diamagnetiche, per le paramagnetiche si riscontra una dipendenza della suscettività dalla temperatura ($\chi = \chi(T)$), infatti, aumentando la temperatura di tali materiali, e, dunque, l'agitazione termica degli atomi, la tendenza ad un certo ordinamento dei dipoli viene in qualche modo ostacolata, quindi la suscettività risulta essere decrescente con l'aumentare della temperatura (Figura 10).

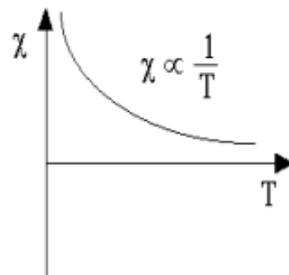


Figura 10 - Andamento della suscettività rispetto alla temperatura nelle sostanze paramagnetiche

Per un ristretto gruppo di sostanze paramagnetiche, la relazione tra suscettività e temperatura può essere individuata nella *legge di Curie*,

$$\chi = \frac{A}{T} \tag{15}$$

dove A è un coefficiente, detto *costante di Curie*, variabile da sostanza a sostanza, ma per la maggior parte di esse, questa relazione è data dalla *legge di Curie-Weiss*

$$\chi = \frac{C}{T+\Delta} \tag{16}$$

dove C è paragonabile alla costante di Curie; Δ è una costante che dipende dalla natura della sostanza e può essere sia positiva che negativa.

La legge di Curie vale solo se la magnetizzazione è lontana dalla saturazione: questa situazione si verifica quando questa grandezza, che dipende dalla somma vettoriale dei dipoli magnetici atomici, raggiunge il suo valore massimo, oltre il quale ulteriori incrementi del campo esterno H non hanno alcun effetto⁴. Vi è da precisare, inoltre, che, per i materiali per cui il momento magnetico è legato principalmente agli spin elettronici, la dipendenza della suscettività dalla temperatura tende a ridursi.

1.2.3. Sostanze ferromagnetiche

Nei materiali ferromagnetici le differenze di comportamento rispetto ai materiali paramagnetici e diamagnetici sono molto rilevanti:

- i fenomeni sono molto più intensi (da 3 a 5 ordini di grandezza rispetto a quelli che si presentano nel vuoto);
- non c'è più proporzionalità tra cause ed effetti: a un campo esterno doppio non corrisponde in generale un valore doppio di induzione magnetica;
- compaiono fenomeni di saturazione, cioè condizioni per le quali aumenti di campo esterno H non determinano corrispondenti variazioni di B .

Per queste sostanze, di cui ne sono esempio il ferro, il nichel o il cobalto, la suscettività magnetica è sempre positiva, come nei materiali paramagnetici, ma ha una forte dipendenza dal campo magnetico esterno ($\chi = \chi(T, H) > 0$). In particolare, tale grandezza ha un andamento prima crescente e poi decrescente rispetto ad H , e ciò a conferma che per un certo valore di intensità del campo esterno si raggiunge la saturazione (Figura 11).

⁴ Per valori elevatissimi dell'intensità del campo esterno, quindi, la disposizione dei dipoli magnetici subisce una certa saturazione, e la suscettività non si mantiene più costante, ma inizia a diminuire.

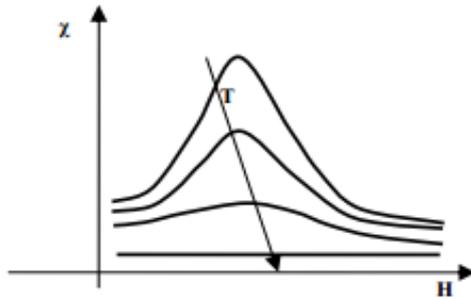


Figura 11 - Andamento della suscettività magnetica rispetto all'intensità del campo esterno al variare della temperatura nelle sostanze ferromagnetiche

La variabilità della suscettività rispetto ad H osservata nella figura sovrastante implica che la relazione tra magnetizzazione e campo esterno è non lineare (Figura 12).

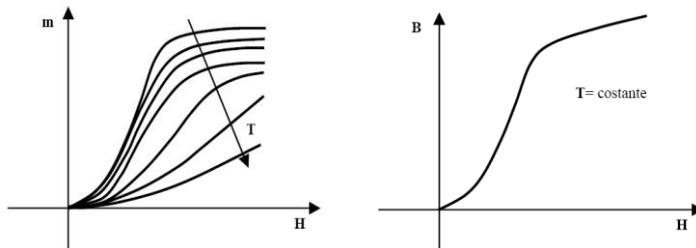


Figura 12 - Andamento della magnetizzazione e dell'induzione magnetica in funzione del campo magnetico esterno e della temperatura per un materiale ferromagnetico.

Dal grafico si evince, inoltre, che all'aumentare della temperatura tale legame tende a divenire lineare come nel caso dei paramagneti [35]. Analogo comportamento ha l'induzione del campo magnetico rispetto ad H .

Un'altra differenza con le sostanze paramagnetiche è che l'intensità supplementare H' può raggiungere valori molto più grandi. Questo fenomeno è dovuto alla presenza di *domini magnetici*, ovvero alla presenza di regioni di magnetizzazione spontanea, le quali si orientano facilmente lungo il campo.

I materiali ferromagnetici, inoltre, raggiunto un certo valore di magnetizzazione, sono caratterizzate da una magnetizzazione residua, la quale fa sì che la sostanza, se sottoposta a diverse magnetizzazioni e demagnetizzazioni, presenti una curva di magnetizzazione, detta *ciclo di*

isteresi⁵, come quella mostrata in Figura 13.

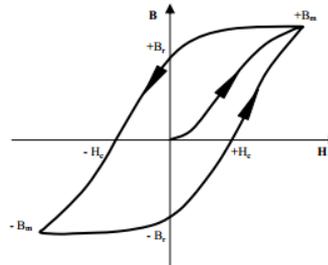


Figura 13 - Ciclo di isteresi caratteristico delle sostanze ferromagnetiche [31]

Osservando il grafico, si evince che il fenomeno dell'isteresi è caratterizzato da due valori relativi a:

- Campo magnetico residuo B_r ;
- Forza coercitiva H_c , che rappresenta l'intensità del campo esterno a cui bisogna sottoporre il materiale per ridurre a zero il campo di induzione magnetica B .

Precedentemente è stato affermato che all'aumentare della temperatura il legame tra magnetizzazione e campo esterno diviene, ad un certo punto, lineare, come nel caso delle sostanze paramagnetiche: in particolare ciò accade per un preciso valore di temperatura, definito come *temperatura di Curie* θ_c . Intorno a quel valore, si assiste ad un cambiamento di fase del secondo ordine del materiale: la sostanza assume un comportamento paramagnetico, infatti la suscettività, oltrepassata la temperatura di Curie, inizia a decrescere. Per quanto detto, il cambiamento di fase del secondo ordine consiste nella variazione in segno della derivata della suscettività rispetto alla temperatura, la quale è positiva per temperature inferiori a quella di Curie, ma è negativa per valori superiori (Figura 14).

⁵ Il risultato dell'isteresi magnetica è una perdita di energia, in quanto si richiede una forza elettromotrice in eccesso per magnetizzare e demagnetizzare un materiale.

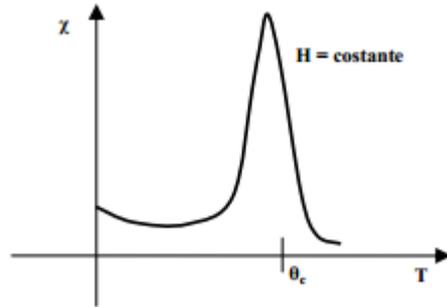


Figura 14 - Andamento della suscettività rispetto alla temperatura a campo costante nelle sostanze ferromagnetiche

Praticamente una sostanza ferromagnetica si comporta come tale per valori di temperatura inferiori alla temperatura di Curie, ma per valori superiori si comporta come un materiale paramagnetico.

Inoltre, dalla Figura 14, è possibile notare che, in prossimità di questa temperatura caratteristica, la suscettività magnetica presenta una crescita rilevante, seguita da una brusca decrescita⁶, osservabile, però, solo in presenza di campi magnetici deboli.

Descritte le principali caratteristiche delle sostanze magnetiche, è possibile formulare i concetti fondamentali che riguardano la termodinamica dei sistemi magnetici.

1.3 Termodinamica dei sistemi magnetici

Prima di passare alla formulazione della prima e della seconda legge della termodinamica per i sistemi magnetici, occorre chiarire il concetto di entropia, caratterizzando tale grandezza per le sostanze magnetiche. A tale termine, in genere, si associa il significato di disordine, il quale, per i materiali in oggetto, può essere ricondotto a tre cause principali, di cui due prettamente di tipo termodinamiche ed una di tipo magnetico. In particolare si parla di:

- *Entropia vibrazionale* S_L , dovuta all'aumento della vibrazione degli atomi che compongono la sostanza a fronte di una

⁶ Tale fenomeno è noto come *effetto Hopkinson*.

somministrazione di calore;

- *Entropia elettronica* S_E , dovuta ad un incremento della casualità degli spin elettronici sempre a fronte di un'adduzione di energia termica;
- *Entropia magnetica* S_M , dovuta alla rimozione di un campo magnetico esterno agente in precedenza sulla sostanza che comporta un aumento del disordine dei dipoli magnetici atomici; sottoponendo la stessa ad un nuovo campo magnetico, tale disordine tende a diminuire (come accennato precedentemente nel caso di sostanze paramagnetiche e ferromagnetiche).

Per quanto detto, l'entropia globale risultante sarà data dalla somma di questi tre contributi [39]:

$$S(T, H) = S_M(T, H) + S_L(T) + S_E(T) \quad 17$$

dove si nota che soltanto la quota S_M dipende sia dalla temperatura che dall'intensità del campo magnetico.

Dalla Figura 15 si nota come la quota di entropia magnetica sia tanto più preponderante rispetto alla somma di quella elettronica con quella vibrazionale quanto più alta è la temperatura.

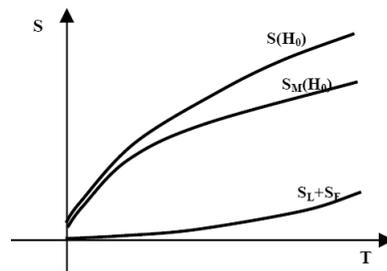


Figura 15 - Andamento dell'entropia vibrazionale (S_L), elettronica (S_E) e magnetica (S_M) in funzione della temperatura e del campo magnetico per una sostanza magnetica

A questo punto è possibile introdurre le leggi fondamentali della termodinamica dei sistemi complessi.

Il primo *principio della termodinamica*, o *legge di conservazione dell'energia*, come è noto, può essere enunciato come:

$$\delta Q = dU + dL \quad 18$$

dove Q è il calore fornito o ceduto, U l'energia interna ed L il lavoro compiuto.

Il lavoro può assumere svariate forme: lavoro di variazione di volume, elettrico, magnetico, di attrito etc.. Nel caso di sostanze magnetiche è possibile considerare il lavoro elementare somma di due contributi: un

primo contributo è il lavoro elementare compiuto da un campo magnetico di intensità H , all'aumentare della magnetizzazione da un valore M fino a $M+dM$, la cui espressione è:

$$\delta L = -HdM \quad 19$$

dove il segno “-“ indica che all'aumentare della magnetizzazione il lavoro viene compiuto sulla sostanza; un secondo contributo, invece, è legato alla possibilità di far variare l'intensità del campo magnetico da H ad $H+dH$, ma dal momento che questo non dà alcun contributo termodinamico, nel scrivere le relazione termodinamiche per le sostanze magnetiche si può tener conto che questo lavoro non vi sia.

Considerando un sistema termodinamico complesso magnetico, il lavoro elementare, quindi, composto da una aliquota magnetica e una di espansione, ha la seguente espressione:

$$dL = pdV - HdM \quad 20$$

Il primo principio, quindi, diventa

$$dU = \delta Q - (\delta L + \delta L^*) = \delta Q - pdV + HdM \quad 21$$

Per il secondo principio della termodinamica, invece, è valida la disuguaglianza di Clausius, la quale, nell'ipotesi di processi internamente reversibili diventa:

$$T\delta S = \delta Q \quad 22$$

Andando a sostituire tale risultato nella prima legge si ottiene

$$dU = T\delta S - pdV + HdM \quad 23$$

$$T\delta S = dU + pdV - HdM \quad 24$$

la quale esprime i due principi fondamentali in un'unica equazione.

In aggiunta alle leggi della termodinamica, per i sistemi magnetici è necessario rivedere anche la definizione di *entalpia* I , la quale rappresenta, nei sistemi classici, la somma dell'energia interna di un sistema e del lavoro di variazione di volume: nella termodinamica complessa è evidente, quindi, che bisogna considerare, nel definire questa grandezza, anche il lavoro compiuto dal campo magnetico, per cui l'entalpia è espressa dalla seguente relazione:

$$I^* = U + pV - HM \quad 25$$

Un'altra grandezza da definire nel caso dei sistemi magnetici è la *capacità termica* c_z data da

$$c_z = \frac{\delta q_z}{dT} \quad 26$$

dove z rappresenta il parametro che rimane costante nel processo in cui si valuta questa grandezza. Supponendo valida la disuguaglianza di

Clausius in un processo internamente reversibile, si può riscrivere

$$c_z = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_z \quad 27$$

Nel caso particolare di sostanze magnetiche è utile introdurre anche i concetti di *capacità termica ad intensità costante del campo magnetico* c_H e di *capacità termica a magnetizzazione costante* c_M , i quali sono stati fondamentali per spiegare alcuni comportamenti rilevati dalle prove sperimentali.

Supponendo di considerare costante la pressione del mezzo in cui si trova la sostanza magnetica, la prima capacità è definita come

$$c_{H,p} = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_{H,p} \quad 28$$

mentre la seconda

$$c_{m,p} = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_{m,p} \quad 29$$

Queste capacità termiche hanno comportamenti differenti a seconda della sostanza presa in considerazione. Di maggior interesse per lo studio in questione è quello relativo ai materiali ferromagnetici, per i quali la capacità termica subisce una brusca crescita nell'intorno della temperatura di Curie, seguita da una successiva decrescita (Figura 16).

Per queste sostanze, inoltre, si nota che, all'aumentare del campo magnetico, il massimo raggiunto dalla capacità termica si sposta verso un valore maggiore di temperatura.

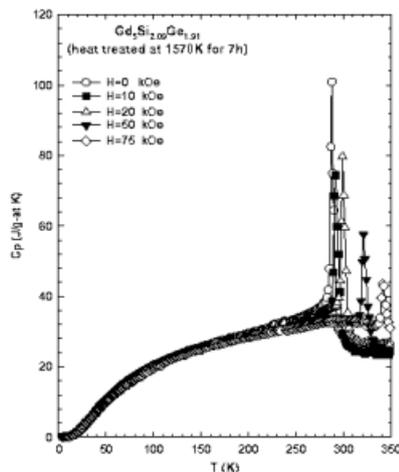


Figura 16 - Andamento della capacità termica rispetto alla temperatura per valori crescenti del campo magnetico per una lega di $Gd_5Si_{2.09}Ge_{1.91}$

Per completare le relazioni termodinamiche per sistemi complessi, è opportuno introdurre le *relazioni di Maxwell* per un sistema posto in un campo magnetico:

$$\left(\frac{\partial m}{\partial T}\right)_{s,V} = \left(\frac{\partial s}{\partial H}\right)_{m,V} \quad 30$$

$$\left(\frac{\partial m}{\partial s}\right)_{H,p} = -\left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_{s,p} \quad 31$$

$$\left(\frac{\partial m}{\partial s}\right)_{T,V} = -\left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_{m,V} \quad 32$$

$$\left(\frac{\partial m}{\partial T}\right)_{H,p} = \left(\frac{\partial s}{\partial H}\right)_{T,p} \quad 33$$

1.4 Trasformazioni termodinamiche fondamentali relative ai sistemi magnetici

Nell'ambito della termodinamica dei sistemi magnetici si riscontrano quattro processi termodinamici reversibili fondamentali:

- Trasformazione isoterma;
- Trasformazione adiabatca;
- Trasformazione isocampo;
- Trasformazione isomagnetica.

Lo studio di questi processi è fondamentale, in quanto due di questi, l'adiabatico e l'isocampo, entrano in gioco nel ciclo inverso magnetico di Brayton, descritto più avanti. Per ognuno di questi quattro, comunque, è possibile mettere in evidenza i risultati ottenibili in termini di variazione di temperatura, di lavoro e di calore, portando alla luce le differenze tra le tre tipologie di sostanze magnetiche.

1.4.1. *Trasformazione isoterma*

Un processo isoterma si ottiene mantenendo invariata la temperatura T della sostanza, facendo variare l'intensità del campo esterno H e, quindi, anche la magnetizzazione M (trasformazione AB di Figura 17).

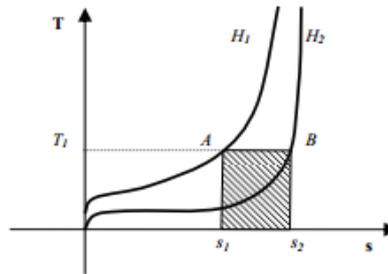


Figura 17 - Trasformazione isoterma per una sostanza paramagnetica o ferromagnetica con $H_1 > H_2$

La variazione dell'entropia S rispetto al campo esterno H avrà un andamento diverso a seconda della sostanza magnetica presa in considerazione:

- Per le sostanze diamagnetiche, un processo isoterma è anche adiabatico, in quanto

$$\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_{T,p} = 0^7 \quad 34$$

- Per le sostanze paramagnetiche, un aumento dell'intensità del campo esterno provoca una diminuzione di entropia, dunque la sostanza cede calore, viceversa una riduzione di H , causa una crescita di S e si ha un'adduzione di calore; questo fenomeno è dovuto al fatto che

$$\left(\frac{\partial S}{\partial H}\right)_{T,p} < 0 \quad 35$$

- Per le sostanze ferromagnetiche si comportano come quelle paramagnetiche.

⁷ Questo risultato deriva dalle relazioni di Maxwell per un sistema posto in un campo magnetico.

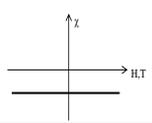
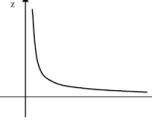
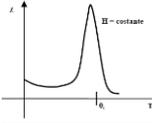
	Grafico	Segno $(\frac{\partial \chi}{\partial T})_{H,p}$
Diamagneti		0
Paramagneti		Negativa
Ferromagneti		Negativa (T > Tc)

Tabella 1 - Trasformazione isoterma su una sostanza magnetica: variazione della suscettività

Per calcolare l'entità di questa variazione è possibile utilizzare la seguente relazione, ottenuta ricorrendo alle relazioni di Maxwell:

$$s_2(T, H_2) - s_1(T, H_1) = \int_{H_1}^{H_2} \left(\frac{\partial m}{\partial T}\right)_{H,p} dH \quad 36$$

con la quale è facilmente calcolabile il calore fornito all'unità di massa di una sostanza sotto l'ipotesi di reversibilità mediante la relazione⁸

$$q_{1-2} = T(s_2 - s_1) \quad 37$$

Il lavoro magnetico, invece, sarà fornito da:

$$l_{1-2}^* = - \int_{m_1}^{m_2} H dm \quad 38$$

Ricordando che

$$M = \chi(T, H) * H \quad 39$$

l'espressione precedente diventa:

$$l_{1-2}^* = - \int_{m_1}^{m_2} \frac{m}{\chi} dm \quad 40$$

dove gli estremi di integrazione si valutano lungo l'isoterma.

1.4.2. Trasformazione adiabatica

Un processo adiabatico è caratterizzato dalla totale assenza di energia scambiata sotto forma di calore. Ponendosi nell'ipotesi di reversibilità, per la seconda legge della termodinamica ciò significa che l'entropia deve

⁸ Rappresenta la disuguaglianza di Clausius per processi internamente reversibili.

rimanere costante (tratto AB in Figura 18).

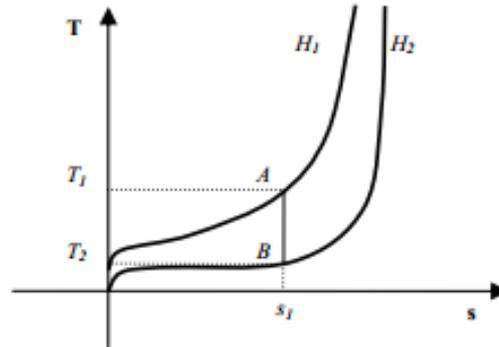


Figura 18 - Trasformazione adiabatica per una sostanza paramagnetica o ferromagnetica con $H_1 > H_2$

Dalla figura si evince che a fronte di una variazione dell'intensità del campo esterno, si ottiene una variazione della temperatura; in particolare riducendo H si verifica una diminuzione di T . Tale fenomeno è spiegabile ricordando la definizione di entropia nel caso di sistemi magnetici: demagnetizzando la sostanza, l'entropia magnetica $S_M(T, H)$ aumenta, in quanto cresce il disordine degli atomi che si comportano come dipoli magnetici, ma l'entropia totale deve rimanere costante, dunque le quote vibrazionale ed elettronica, che dipendono solo dalla temperatura, si riducono, e ciò comporta una diminuzione di quest'ultima grandezza.

Per calcolare l'entità di tale variazione si può utilizzare la seguente relazione:

$$T_2 - T_1 = \int_{H_1}^{H_2} \left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_{s,p} dH \quad 41$$

La derivata che compare sotto il segno di integrale, applicando dei passaggi matematici, può essere espressa nel seguente modo:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_{s,p} = - \frac{T}{c_{H,p}} \left(\frac{\partial m}{\partial T} \right)_{H,p} \quad 42$$

Il segno di questa equazione è determinato unicamente dalla derivata al secondo membro, che esprime l'andamento della magnetizzazione rispetto alla temperatura, quindi:

- Per le sostanze diamagnetiche, a fronte di una variazione del campo esterno H , non si ha alcuna variazione di temperatura in quanto

$$\left(\frac{\partial m}{\partial T}\right)_{H,p} = 0 \quad 43$$

- Per le sostanze paramagnetiche, ad una diminuzione del campo esterno corrisponde una diminuzione di temperatura (*demagnetizzazione adiabatica*), mentre un aumento di H comporta un incremento di T (*magnetizzazione adiabatica*), in quanto

$$\left(\frac{\partial m}{\partial T}\right)_{H,p} < 0 \quad 44$$

- Per le sostanze ferromagnetiche il comportamento è analogo alle paramagnetiche.

Per quanto riguarda il lavoro, la sua espressione è simile a quella utilizzata per i processi isotermi, con l'unica differenza che gli estremi di integrazione devono essere valutati lungo l'isoentropica.

1.4.3. Trasformazione isocampo

Il processo isocampo è caratterizzato da un valore dell'intensità del campo magnetico costante, dunque, durante la sua attuazione, si verificano variazioni di entropia e temperatura, oltre che di magnetizzazione nel caso di sostanze in cui quest'ultima dipenda anche dalla temperatura (tratto AB in Figura 19).

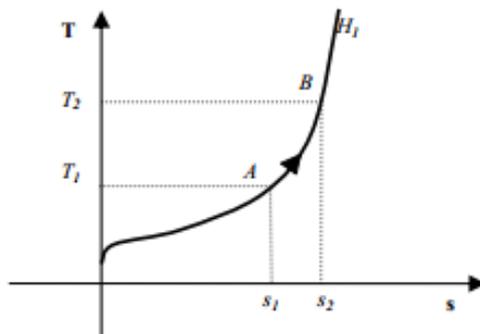


Figura 19 - Trasformazione isocampo per una sostanza ferromagnetica o paramagnetica

Per ottenere la quantità di calore che viene scambiata durante tale tipo di processo, si riprende l'equazione che racchiude le due leggi della

termodinamica per i sistemi magnetici:

$$T\delta S = dU + pdV - HdM \quad 45$$

Si consideri ora la definizione di entalpia nel caso di questi sistemi e la si differenzi:

$$di^* = du + pdv + vdp - Hdm - mdH \quad 46$$

Andando a sostituire nell'equazione precedente, prendendo grandezze specifiche, si ottiene:

$$T\delta s = di^* - vdp + mdH \quad 47$$

Nel processo in esame, però, l'intensità del campo esterno è costante, e tale è anche la pressione, quindi la relazione precedente diventa semplicemente:

$$T\delta s = di^* \quad 48$$

$$q_{1-2} = i_2^* - i_1^* \quad 49$$

La quantità di calore scambiata nel passare dallo stato 1 al 2 attraverso un processo isocampo, dunque, è data dalla differenza dell'entalpia ridefinita per i sistemi magnetici.

Per quanto riguarda la variazione di entropia, questa è fornita dalla relazione

$$s_2(H, T_2) - s_1(H, T_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_{H,p}}{T} dT \quad 50$$

in quanto vale l'uguaglianza

$$\frac{c_{H,p}}{T} = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_{H,p} \quad 51$$

la quale non è altro che la definizione di capacità termica illustrata nei paragrafi precedenti.

L'entropia, dunque, cresce se aumenta anche la temperatura, e ciò lo si poteva già intuire osservando la Figura 19.

Infine, il lavoro compiuto dal campo magnetico sarà sempre fornito da

$$l_{1-2}^* = - \int_{m_1}^{m_2} HdM \quad 52$$

Il campo esterno H , però, essendo costante, può essere portato fuori dal termine integrale, ottenendo

$$l_{1-2}^* = -(Hm_2 - Hm_1) \quad 53$$

Andando a sostituire ai valori di magnetizzazione la suscettività magnetica si ha

$$l_{1-2}^* = -H^2[\chi(H, T_2) - \chi(H, T_1)] \quad 54$$

che permette di effettuare alcune considerazioni:

- Le sostanze diamagnetiche presentano un valore costante della suscettività al variare della temperatura, quindi il lavoro

magnetico è nullo;

- Nelle sostanze ferromagnetiche e paramagnetiche, se $T_2 > T_1$ il lavoro è positivo e viene compiuto dal materiale, viceversa se succede il contrario. Questo fatto è facilmente comprensibile, in quanto se la temperatura cresce dallo stato 1 al 2, allora la suscettività diminuirà, quindi il termine all'interno delle parentesi quadre dell'ultima equazione sarà negativo.

1.4.4. Trasformazione isomagnetica

In questa tipologia di processo viene mantenuta costante la magnetizzazione m della sostanza, facendo variare la sua temperatura e l'intensità del campo esterno in maniera opportuna.

Come fatto per la trasformazione isocampo, per definire la quantità di calore scambiato si riprende l'equazione

$$T\delta s = du + pdv - Hdm$$

nella quale il secondo addendo del secondo membro può essere riscritto come

$$pdv = d(pv) - vdp \quad 55$$

ottenendo

$$T\delta s = d(u + pv) - vdp - Hdm \quad 56$$

Il processo in questione, però, è caratterizzato, oltre che da una magnetizzazione costante, anche da una pressione costante, quindi l'equazione diventa

$$T\delta s = d(u + pv) \quad 57$$

dove il termine $u + pv$ rappresenta un potenziale termodinamico, ovvero l'entalpia ordinaria, così come è stata definita nei paragrafi precedenti.

In definitiva la quantità di calore scambiata durante un processo isomagnetico è data dalla differenza di entalpia ordinaria:

$$q_{1-2} = i_2 - i_1 \quad 58$$

La variazione di entropia, invece, è fornita dalla seguente equazione, analogamente alla trasformazione isocampo:

$$s_2(m, T_2) - s_1(m, T_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_{m,p}}{T} dT \quad 59$$

essendo valida l'uguaglianza

$$\frac{c_{m,p}}{T} = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_{m,p} \quad 60$$

Per quanto riguarda il lavoro compiuto dal campo magnetico, esso è sempre nullo per il tipo di trasformazione in oggetto, in quanto non si ha una variazione della magnetizzazione della sostanza.

$$l_{1-2}^* = - \int_{m_1}^{m_2} H dm \Rightarrow dm = 0 \Rightarrow l_{1-2}^* = 0 \quad 61$$

1.5 L'effetto magnetocalorico e la refrigerazione magnetica

L'effetto magnetocalorico di una sostanza magnetica⁹, scoperto nel 1881 ad opera di Warburg, può essere definito come la capacità di tale sostanza di riscaldarsi o di raffreddarsi a seconda che essa sia magnetizzata o demagnetizzata per mezzo di una sorgente di campo magnetico esterna (Figura 20).

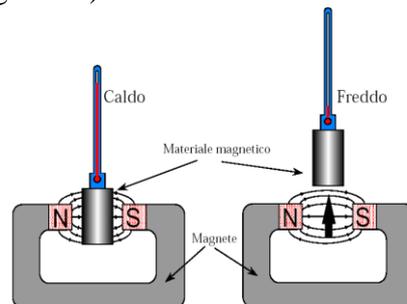


Figura 20 - Rappresentazione dell'effetto magnetocalorico

L'analisi effettuata nel precedente paragrafo riguardo i processi termodinamici fondamentali ha messo in evidenza alcuni comportamenti che permettono di quantificare l'effetto magnetocalorico. In particolare:

- Compiendo una trasformazione adiabatica ed internamente reversibile, facendo variare il campo magnetico esterno H , si osserva un cambiamento nella temperatura della sostanza (ΔT_{ad});
- Compiendo una trasformazione isoterma ed internamente reversibile, facendo variare il campo magnetico esterno H , si osserva un cambiamento dell'entropia della sostanza (ΔS_M).

⁹ Eccetto le sostanze diamagnetiche.

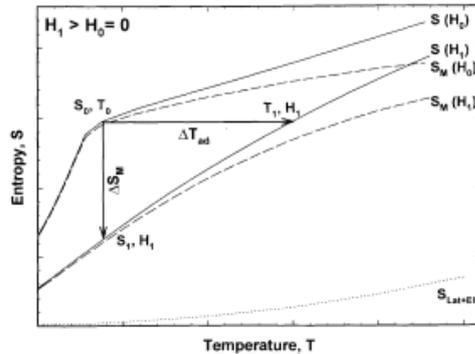


Figura 21 - Rappresentazione dell'effetto magnetocalorico per una sostanza ferromagnetica

La Figura 21 mette chiaramente in evidenza le due variazioni sopra citate, oltre a fornire anche l'andamento delle tre quote di entropia [35].

In un processo isoterma, quindi, una variazione positiva del campo magnetico (magnetizzazione isoterma), comporta una diminuzione dell'entropia magnetica ($S_M(H_1) < S_M(H_0)$), lasciando invariate la quota vibrazionale ed elettronica S_{L+E} . L'entropia totale, quindi, diminuisce e la misura dell'effetto magnetocalorico è rappresentata dall'ampiezza dell'intervallo ΔS_M , che dipende dalla temperatura di partenza, il quale può essere espresso da

$$\Delta S_M = \int_{H_1}^{H_2} \left(\frac{\partial m}{\partial T} \right)_{H,p} dH \quad 62$$

Il massimo valore della variazione entropica lo si ottiene nell'intorno della temperatura per il quale avviene la transizione di fase, che implica un significativo cambiamento della magnetizzazione. Nei materiali caratterizzati da una transizione di fase del primo ordine¹⁰, la variazione di quest'ultima conduce improvvisamente ad un ampio MCE¹¹ in piccoli intervalli di temperatura. Nelle sostanze caratterizzate da una transizione

¹⁰ Le transizione di fase del primo ordine sono caratterizzate dalla presenza di calore latente. Durante queste, un sistema termodinamico assorbe o rilascia una quantità di energia fissa e, generalmente, grande. Esse sono caratterizzate da regimi bifasici, in cui coesistono, nello stesso tempo, porzioni del sistema che hanno completato la trasformazione ed altre che ancora non lo hanno fatto. La variazione della magnetizzazione, inoltre, avviene in maniera discontinua.

¹¹ MCE: MagnetoCaloric Effect.

di fase del secondo ordine¹², un più basso valore di MCE è ottenuto in un intervallo di temperatura più ampio [30], come accade per il gadolinio puro *Gd*.

In generale, se l'entropia della sostanza magnetica diminuisce per mezzo di una magnetizzazione isoterma, allora essa cede calore verso l'esterno; al contrario, se il materiale viene demagnetizzato in maniera isoterma, allora l'entropia cresce, per cui la sostanza assorbe calore.

La Figura 22 mostra l'organizzazione dei dipoli magnetici prima e dopo l'applicazione del campo magnetico esterno nel caso di una trasformazione isoterma.

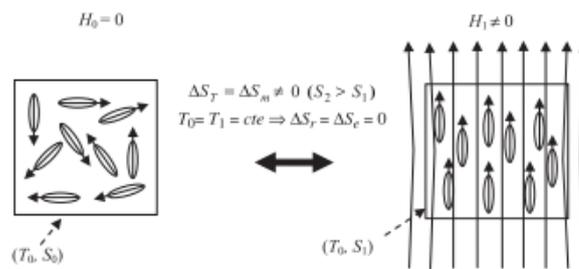


Figura 22 - Organizzazione dei dipoli magnetici di una sostanza ferromagnetica prima e dopo l'applicazione di un campo magnetico esterno nel caso di un processo isoterma [20]

In un processo adiabatico, invece, modificando l'intensità del campo magnetico esterno, l'entropia totale rimane costante durante tutta la trasformazione. Ricordandosi delle considerazioni effettuate nel paragrafo 1.4.2 relative alle sostanze ferromagnetiche e paramagnetiche nel caso di una magnetizzazione adiabatica, il risultato di questo processo è un aumento dell'entropia termodinamica ($S_L + S_E$), necessario a bilanciare la riduzione dell'entropia magnetica S_M , che si traduce in una maggiore agitazione termica, dunque, un ovvio incremento di temperatura, il quale dipende dal valore della variazione del campo magnetico. Il contrario, invece, avviene nel caso di una demagnetizzazione. In entrambi i casi, comunque, si ottiene una variazione di temperatura, definita *differenza di temperatura adiabatica* ΔT_{ad} , che dipende, come la variazione di entropia, dalla temperatura di partenza.

Per ricavare l'intensità di tale effetto, è sufficiente riprendere i risultati ottenuti nel paragrafo 1.4.2 in merito alla variazione di temperatura, la

¹² Le transizioni di fase del secondo ordine sono caratterizzate dall'assenza di calore latente. In questo caso, la variazione della magnetizzazione avviene in maniera continua.

quale rappresenta proprio ΔT_{ad}

$$\Delta T_{ad}(T, \Delta H) = - \int_{H_0}^{H_1} \left(\frac{T}{c_{H,p}} \right) \left(\frac{\partial m}{\partial T} \right)_{H,p} dH \quad 63$$

che risulta essere direttamente proporzionale alla temperatura assoluta, alla derivata della magnetizzazione M rispetto alla temperatura a pressione e campo esterno costante, ed alla variazione di H , mentre è inversamente proporzionale alla capacità termica, sempre a pressione e campo esterno costante.

Al livello atomico, i momenti magnetici individuali si allineano con il campo esterno, riducendo così l'entropia magnetica del campione ferromagnetico o paramagnetico; il contrario avviene nel caso di una rimozione o riduzione del campo magnetico (Figura 23).

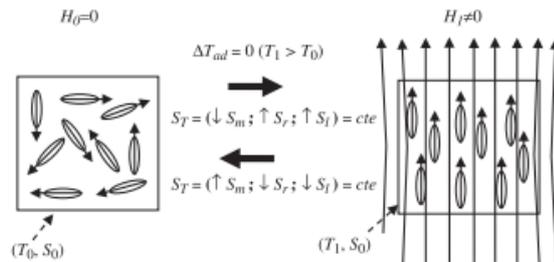


Figura 23 - Organizzazione dei dipoli magnetici di una sostanza ferromagnetica prima e dopo l'applicazione di un campo magnetico esterno nel caso di un processo adiabatico

In definitiva, le equazioni che esprimono la variazione di entropia e la differenza di temperatura adiabatica rappresentano l'intensità dell'effetto magnetocalorico, ed, in base ad esse, si può concludere che l'MCE è tanto più grande quanto:

- più la variazione del campo esterno è elevata;
- più la variazione della magnetizzazione rispetto alla temperatura è grande, ovvero quanto più il valore di $\left(\frac{\partial m}{\partial T} \right)_{H,p}$ è alto;
- più il materiale presenta una capacità termica bassa [20].

Oltre a quanto detto, è possibile effettuare le seguenti considerazioni:

1. dato che la magnetizzazione a campo costante di un paramagnete o di un ferromagnete decresce con l'incremento della temperatura, allora ΔS_M sarà positivo, e ΔT_{ad} negativo;
2. in generale la variazione della magnetizzazione rispetto alla temperatura è molto grande nella zona di transizione di fase, e ciò significa che, nei ferromagneti, questa sarà elevata nelle vicinanze

della temperatura di Curie¹³, dunque ΔS_M ammette un massimo nell'intorno di tale valore;

3. l'effetto descritto nel punto 2) permette di incrementare anche ΔT_{ad} , la quale, però, è influenzata anche dalla capacità termica, che, nell'intorno della temperatura di Curie, presenta un comportamento anomalo (paragrafo 1.3); un alto valore di tale grandezza riduce la variazione di temperatura adiabatica, in quanto le due variabili sono inversamente proporzionali, quindi, peggiora l'MCE.

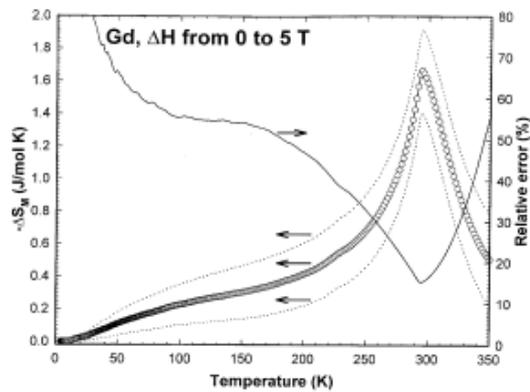


Figura 24 - Il ΔS_M per il gadolinio Gd per una variazione del campo magnetico da 0 a 5 T ricavato da dati sperimentali della capacità termica. Le curve a punti rappresentano l'intervallo dell'errore assoluto [35].

¹³ Si ricorda che la temperatura di Curie rappresenta quel valore di temperatura per la quale si assiste ad una transizione del secondo ordine dei materiali ferromagnetici.

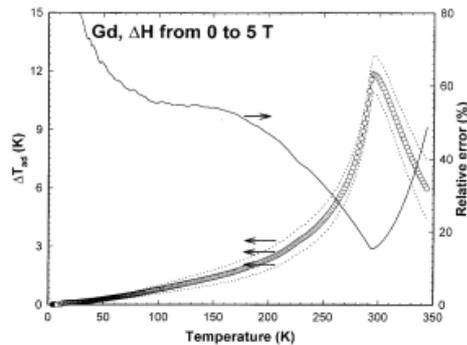


Figura 25 - Il ΔT_{ad} per il gadolinio Gd per una variazione del campo magnetico da 0 a 5 T ricavato da dati sperimentali della capacità termica. Le curve a punti rappresentano l'intervallo dell'errore assoluto [35].

1.6 Cicli di riferimento nella refrigerazione magnetica e parametri caratteristici

1.6.1. Il ciclo magnetico inverso di Brayton

Nel campo della refrigerazione magnetica a temperatura ambiente il ciclo Brayton rappresenta una delle strade percorribili per riuscire a sfruttare l'effetto magnetocalorico in maniera tale da soddisfare un carico frigorifero.

Nella trattazione classica il ciclo inverso Brayton è meglio conosciuto come ciclo inverso Joule, in cui un gas, la sostanza evolvente, prevede le seguenti trasformazioni (Figura 26):

- sottrazione di calore a pressione costante (AB);
- diminuzione di temperatura isoentropica (BC);
- adduzione di calore a pressione costante (CD);
- aumento di temperatura isoentropico (DA).

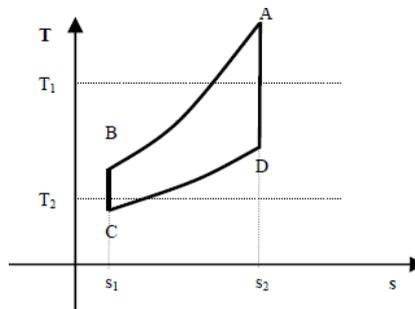
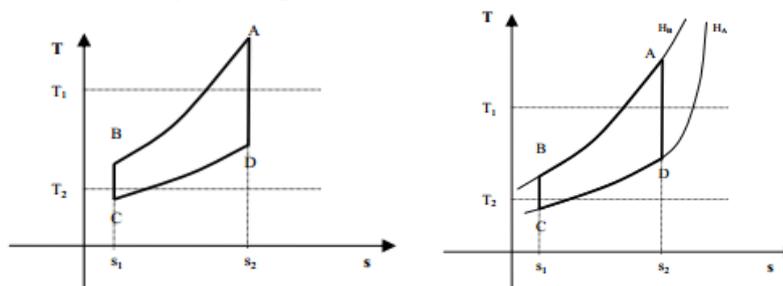


Figura 26 - Rappresentazione del ciclo Brayton o Joule nel piano T-s

Volendo realizzare nel campo della refrigerazione magnetica un ciclo termodinamico simile ad uno Brayton, è necessario adoperare processi termodinamici complessi, sperimentati da un solido, aventi le stesse caratteristiche del ciclo Brayton tradizionale: aumento (diminuzione) di temperatura a entropia costante e adduzione (sottrazione) con aumento (diminuzione) di temperatura e entropia.

Ricorrendo a quanto detto nel paragrafo 1.4 i processi isobari sono sostituiti da processi isocampo mentre i processi di compressione-espansione da processi di magnetizzazione-demagnetizzazione adiabatici ed internamente reversibili.

Nella figura seguente si nota a sinistra il ciclo Brayton tradizionale a destra il ciclo Brayton magnetico:



AB	Sottrazione di calore a pressione costante	Sottrazione di calore a campo costante
BC	Diminuzione di temperatura isoentropica	Demagnetizzazione adiabatica
CD	Adduzione di calore a pressione costante	Adduzione di calore a campo costante
DA	Aumento di temperatura isoentropico	Magnetizzazione adiabatica

Figura 27 - Ciclo Brayton o Joule inverso in un piano e ciclo Brayton magnetico nel piano T-s

Le temperature medie T_1 e T_2 a cui avvengono gli scambi di calore possono essere considerate come le temperature medie superiore e inferiore del ciclo inverso di Carnot equivalente.

Nel ciclo Brayton magnetico, partendo dal processo AB, si assiste ad una riduzione di temperatura e entropia totale, dovuta quest'ultima al solo contributo della parte termodinamica (vibrazionale ed elettronica) dal momento che il campo esterno H_B è costante; in tal senso si ha una sottrazione di calore della sostanza magnetica verso l'ambiente esterno pari all'area definita da s_1s_2AB .

La fase successiva è caratterizzata dalla demagnetizzazione adiabatica BC, il cui salto di temperatura, dipendente dal valore della demagnetizzazione e dalla temperatura iniziale, permette al solido di raggiungere una temperatura inferiore alla temperatura del fluido da raffreddare.

A questo punto il materiale magnetico può sottrarre energia termica a un fluido esterno ottenendo un effetto frigorifero pari all'area s_1s_2CD ; questo processo (CD) è caratterizzato da un aumento di temperatura ed entropia del solido con un campo esterno $H_A < H_B$ costante.

Completato lo scambio termico con il fluido il ciclo termina con la fase di magnetizzazione adiabatica (DA). In quest'ultima fase una diminuzione di entropia magnetica e un pari aumento della quota termica mantengono l'entropia totale costante e innalzano la temperatura del solido, che, come è già noto, dipende dal valore del campo esterno e dalla temperatura iniziale.

Da quanto esposto, è possibile dedurre i numerosi vantaggi del ciclo Brayton magnetico rispetto a quello a gas. Dal punto di vista energetico, sostituendo alla fase di compressione di un gas con la magnetizzazione, si ha una notevole riduzione della spesa energetica, infatti nel caso del refrigeratore magnetico è necessario fornire soltanto energia per realizzare la fase di magnetizzazione; inoltre, grazie anche all'assenza dell'organo di espansione, sostituito con la fase di demagnetizzazione, si ha una riduzione dei fenomeni di irreversibilità caratteristici dei sistemi a compressione di vapore. Un ulteriore vantaggio è la totale assenza di gas refrigeranti dannosi all'ambiente quali gli CFC e gli HFC; le sostanze refrigeranti impiegabili, infatti, sono delle sostanze solide il cui impatto ambientale diretto è nullo.

Tuttavia, nel ciclo magnetico inverso di Brayton la differenza di temperatura tra la sorgente calda e quella fredda risulta essere inferiore

alla variazione di temperatura adiabatica tipica della sostanza refrigerante impiegata.

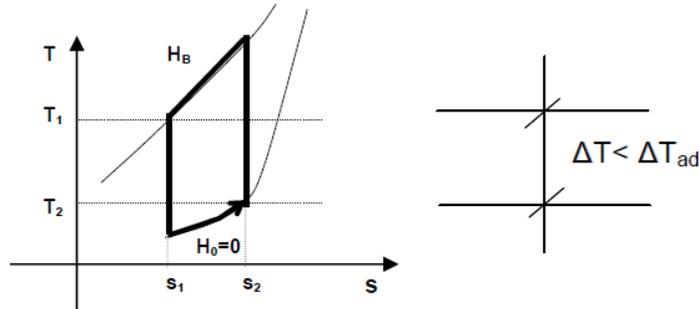


Figura 28 -Salto termico ottenibile mediante un ciclo Brayton non rigenerativo

Tenuto conto che a temperatura ambiente le sostanze magnetiche refrigeranti conosciute riescono a raggiungere modesti valori di ΔT_{ad} (circa 3 K/T), si comprende come un refrigeratore operante mediante un ciclo magnetico Brayton sia caratterizzato da salti termici di gran lunga inferiori a quelli tipici delle applicazioni a temperatura ambiente, facilmente raggiungibili, invece, per mezzo di macchine frigorifere operanti mediante cicli a compressione di vapore.

Una possibile risoluzione a tale problematica è ottenibile mediante il principio della rigenerazione di cui si tratterà nel seguente paragrafo.

1.6.2. Il ciclo AMR

Per superare i limiti del ciclo magnetico inverso di Brayton, è possibile attuare il principio della rigenerazione, ottenendo così il cosiddetto ciclo *Active Magnetic Regenerator (AMR)*. In tale ciclo la sostanza magnetica funge non solo da refrigerante, fornendo una variazione di temperatura a fronte di una magnetizzazione o demagnetizzazione, ma anche come rigeneratore per un fluido, detto *rigenerante*, in grado di trasferire energia termica.

Un refrigeratore magnetico operante mediante il ciclo AMR è composto di cinque elementi fondamentali (Figura 29):

1. il magnete, che magnetizza o demagnetizza la sostanza refrigerante;

2. il rigeneratore¹⁴, appena definito;
3. lo scambiatore di calore lato freddo, in cui viene ceduto calore al fluido rigenerante a spese di una sorgente esterna a temperatura più alta;
4. lo scambiatore di calore alla lato caldo, che dissipa l'energia termica trasportata dal fluido rigenerante con una sorgente esterna a temperatura più bassa;
5. il displacer, cioè l'elemento che permette al fluido rigenerante di attraversare il rigeneratore.

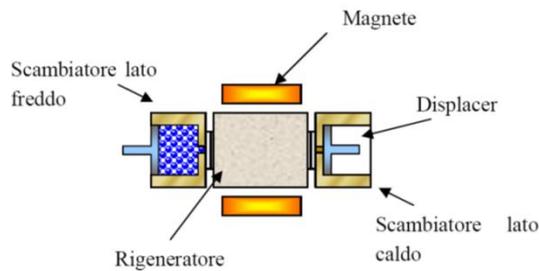


Figura 29 - Schema di un refrigeratore magnetico AMR

Il principio di funzionamento di tale tecnologia può essere schematizzato mediante i seguenti processi:

1. magnetizzazione adiabatica: il rigeneratore viene investito dal campo magnetico esterno che innalza il suo profilo di temperatura di una quantità pari alla differenza di temperatura adiabatica, che varia rispetto alla lunghezza, in quanto dipende dalla temperatura iniziale;

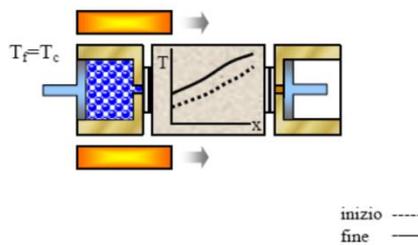


Figura 30 - Fase di magnetizzazione adiabatica di un ciclo AMR

¹⁴ Il rigeneratore, in questo caso, viene definito attivo in quanto è in grado di variare la sua temperatura anche per effetto di magnetizzazioni o demagnetizzazioni.

2. sottrazione di calore isocampo: il rigeneratore, mantenendo costante il campo magnetico che lo investe, viene attraversato dal fluido rigenerante proveniente dallo scambiatore della sorgente fredda, che, trovandosi ad una temperatura più bassa rispetto all'estremo freddo, si riscalda per essere inviato nello scambiatore lato caldo prelevando energia termica dalla sostanza magnetica, la quale, viceversa, si raffredda;

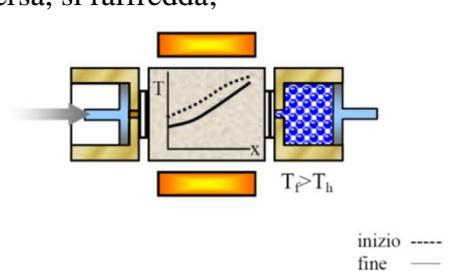


Figura 31 - Fase di raffreddamento isocampo nel ciclo AMR

3. demagnetizzazione adiabatica: il campo magnetico che investe il rigeneratore viene rimosso, e ciò causa un abbassamento del profilo di temperatura del rigeneratore per effetto magnetocalorico, il quale varia lungo l'asse del rigeneratore stesso;

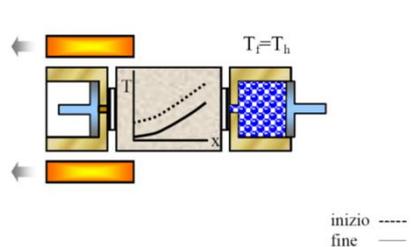


Figura 32 - Fase di demagnetizzazione adiabatica nel ciclo AMR

4. adduzione di calore isocampo: mantenendo nullo il valore del campo magnetico esterno, il rigeneratore viene attraversato dal fluido rigenerante, stavolta proveniente dallo scambiatore lato caldo, il quale si trova ad una temperatura maggiore rispetto all'estremo caldo della sostanza magnetica, dunque cederà energia in suo favore raffreddandosi per essere inviato nello scambiatore lato freddo, mentre il profilo di temperatura trasla verso l'alto.

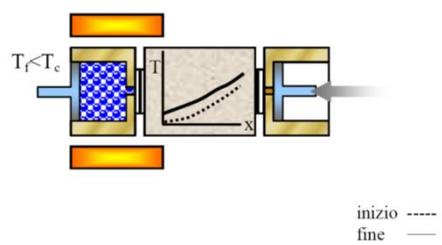


Figura 33 - Fase di riscaldamento isocampo nel ciclo AMR

Dal momento che ogni sezione del rigeneratore è caratterizzata da una temperatura differente è facile comprendere come per un refrigeratore del tipo AMR non ha senso parlare di un unico ciclo di riferimento bensì ne esisteranno infiniti l'uno in cascata all'altro, ovvero uno per ogni porzione elementare del refrigerante magnetico. Tale peculiarità la si riscontra osservando che, sul piano termodinamico T-s (Figura 34), il ciclo di riferimento conseguente risulta subire uno stiramento rispetto a quello relativo al ciclo Brayton magnetico.

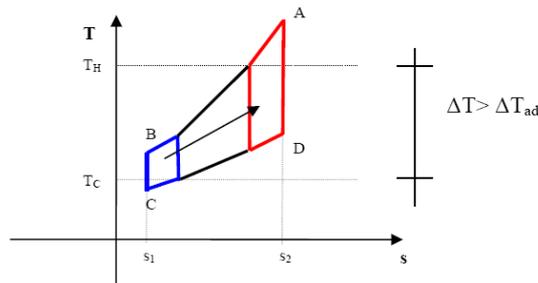


Figura 34 – Rappresentazione dello “stiramento” tipico di un ciclo rigenerativo AMR sul piano T-s

In tal senso è possibile comprendere come il salto termico ottenibile da un refrigeratore operante secondo un siffatto ciclo sia superiore della variazione di temperatura adiabatica e quindi molto più elevato rispetto a quello permesso dal ciclo Brayton magnetico non rigenerativo.

CAPITOLO 2: Il prototipo di refrigeratore magnetico a magneti permanenti rotanti

La macchina sviluppata presso il Laboratorio di Tecnica del Freddo (LTF) dell'Università degli Studi di Salerno è un refrigeratore magnetico a magneti permanenti rotanti dove il materiale magnetocalorico (MCM) è fermo mentre i magneti sono rotanti. Il nome “8Mag” del prototipo è dovuto alla forma ottagonale del sistema magnetico e al numero totale di rigeneratori adottati, pari a 8. In questo capitolo viene presentata l'architettura della macchina e i principali componenti che la costituiscono.

2.1 Gruppi magnetici

Il gruppo magnetico (Figura 35 e Figura 36) è composto da un insieme di quattro magneti permanenti assemblati secondo una configurazione “a doppia U”.



Figura 35 - Vista laterale del sistema magnetico e della valvola rotante

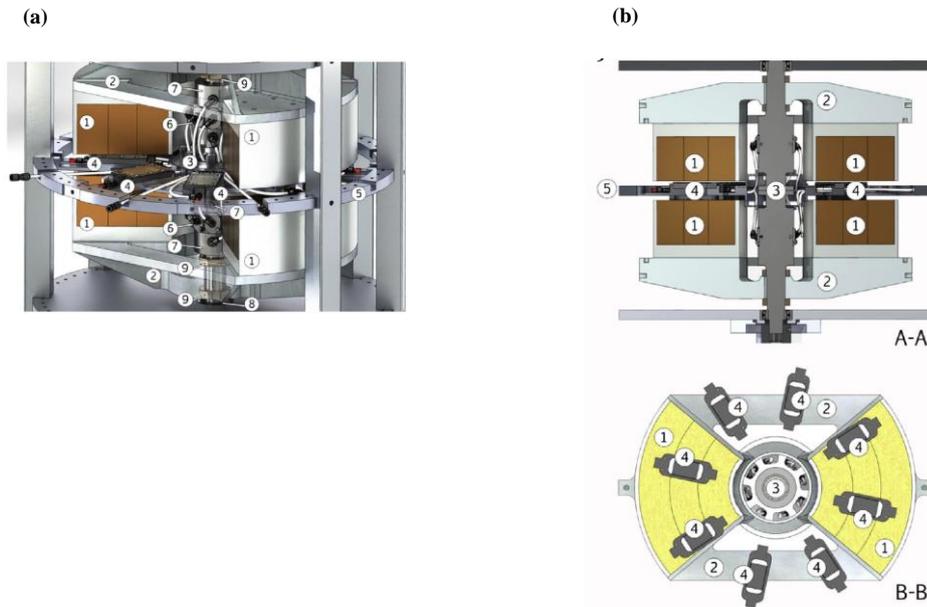


Figura 36 - (a) Dettaglio di 8Mag: 1) magneti permanenti; 2) supporto dei magneti; 3) valvola rotante; 4) rigeneratore; 5) supporto dei rigeneratori; 6) collettore da/verso i rigeneratori; 7) collettore da/verso gli scambiatori; 8) cuscinetti; 9) ghiera di regolazione. (b) Sezione longitudinale (A-A) e assiale (B-B) della macchina

I magneti sono montati su supporti di alluminio e alloggiati su una valvola rotante, in modo che l'asse di simmetria della configurazione ad U coincida con l'asse di rotazione del gruppo magnetico. Grazie alla configurazione adottata si ottengono due regioni ad alto campo magnetico ed altrettante a campo magnetico nullo; in particolare, mentre le prime sono caratterizzate da valori maggiori o uguali al 90% del picco di induzione magnetica, le seconde hanno un valore dell'induzione magnetica minore o uguale al 2% del massimo valore del flusso magnetico.

L'obiettivo dell'architettura del gruppo magnetico è duplice: ottenere delle regioni con un'induzione magnetica più uniforme possibile e la possibilità di utilizzare una grande quantità di materiale magnetocalorico.

Il prezzo che bisogna pagare per un'accessibilità ai rigeneratori è un

traferro molto ampio e quindi una riduzione dell'efficienza del sistema magnetico.

Come risultato di una serie di ottimizzazioni numeriche basate su modelli di tipo FEM, si è ottenuto un gruppo magnetico realizzato secondo una disposizione dei magneti del tipo Halbach. Come mostrato in Figura 37, ogni regione magnetica è composta da 6 blocchi magnetizzati secondo diverse orientazioni: quattro orizzontali e due verticali.

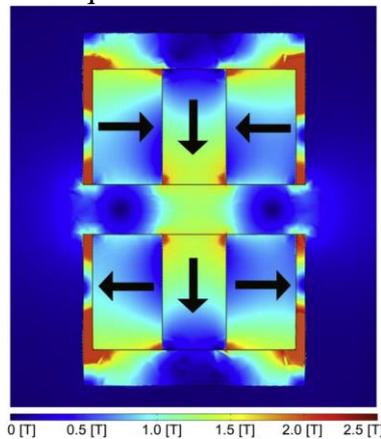


Figura 37 - Sezione longitudinale della configurazione Halbach array adottata in 8Mag

Ciò permette di rafforzare il campo magnetico nel traferro e di annullarlo altrove. Ognuno di questi blocchi è composto da 90 magneti incollati tra di loro e incastrati su un supporto di ferro. Ogni segmento è composto di NdFeB sinterizzato con un'induzione magnetica residua di 1370 mT (secondo quanto dichiarato dal costruttore).

Il progetto del gruppo magnetico comprende l'utilizzo di due coppie di ghiera sul supporto della valvola rotante in modo da poter variare il traferro da un minimo di 20 mm a un massimo di 50 mm. La configurazione attuale ha una distanza tra i due "poli" di 43 mm.

La densità del flusso magnetico è stata misurata con un magnetometer Wuntronic Koshava 5 in funzione dell'angolo, del raggio e dell'altezza del traferro. Come mostrato nella seguente figura l'induzione magnetica è periodica con un periodo di 180° , con un picco dell'intensità del flusso magnetico di 1.25 T nella regione ad alto campo magnetico e di 0.01 T nella regione di demagnetizzazione.

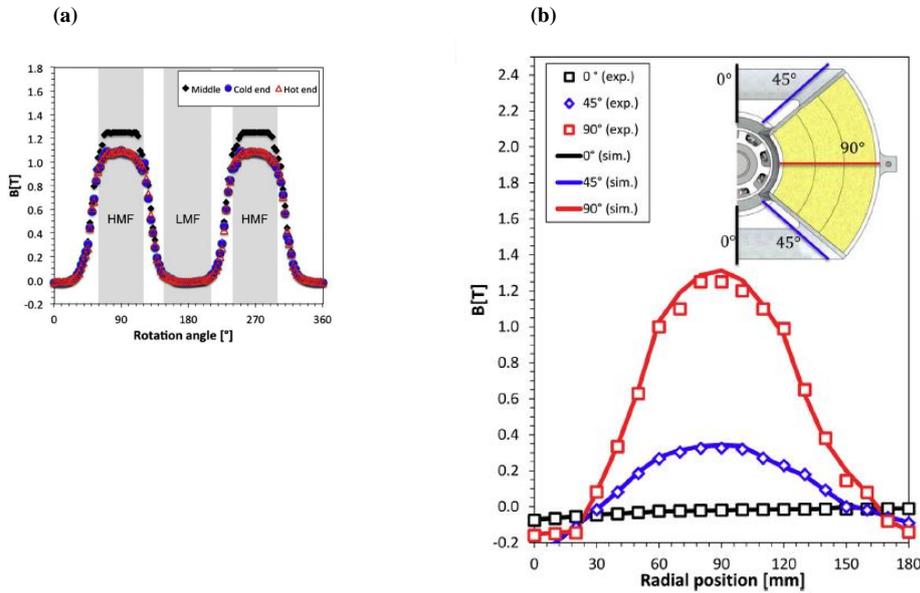


Figura 38 - (a). Misura dell'induzione magnetica in funzione dell'angolo di rotazione in tre differenti posizioni radiali: hot end (200mm), middle end (177.5 mm), cold end (155 mm). (b) Induzione magnetica in funzione della posizione radiale per tre differenti posizioni angolari: 0°, 45° e 90°

Inoltre, come mostrato nella Figura 38, la prima regione ha un'ampiezza di 60° mentre la seconda di 70°. Lo spazio restante diventa una regione di transizione.

Per confrontare differenti tipi di progetti di gruppi magneti è molto importante trovare un parametro di confronto globale.

Nel presente testo per caratterizzare un progetto di un magnete usato nella refrigerazione magnetica si è considerato il parametro Λ_{cool} proposto da Bjork et al.(2008).

Il parametro Λ_{cool} è definito come:

$$\Lambda_{cool} = \left(\overline{B_{in}^{\frac{2}{3}}} - \overline{B_{out}^{\frac{2}{3}}} \right) \frac{V_{field}}{V_{mag}} P_{field} \quad 64$$

dove V_{mag} è il volume del magnete(i), V_{field} è il volume dove è generato un alto campo di induzione, P_{field} è la frazione di un ciclo AMR in cui il materiale magnetocalorico entra nel volume ad alto campo induttivo, $\overline{B_{in}^{\frac{2}{3}}}$ è il valore medio dell'induzione magnetica elevata a 2/3 nel volume ad alta induzione magnetica e $\overline{B_{out}^{\frac{2}{3}}}$ è il valore medio del campo di induzione magnetico elevato a 2/3 nel volume dove il materiale

magnetocalorico viene posizionato quando viene demagnetizzato.

Dalla distribuzione del flusso magnetico di Figura 38, si evince la presenza sia di un volume di 60° di ampiezza dove il flusso di induzione magnetico medio è 1.12T che di un campo di induzione della regione demagnetizzata con valore pari a 0.06 T; di conseguenza, dall'equazione suddetta, il valore di Λ_{cool} del prototipo oggetto di studio è di 0.08.

AUTORE	Vmag [l]	Vfield [l]	 [T]	 [T]	Pfield	Λ_{cool}
<i>Geometria costituita da blocchi di magneti rettangolari</i>						
Zheng et al. (2009)	0,5	0,09	0,93	0	0,9	0,15
Vasile and Nuller (2006)	9,2	0,75	1,9	0	0,9	0,11
Tagliafico et al. (2009)	0,68	0,07	1,55	0	0,95	0,13
<i>Magneti basati su un progetto di Cylinder Halbach</i>						
8MAG Laboratorio TdF	17,3	1,17	1,2	0	1	0,08
Lee et al. (2002)	14,6	0,32	1,9	0	0,9	0,03
Engelbrecht et al. (2009)	0,5	0,07	1,03	0	0,5	0,07
Tura and Rowe (2007)	1,03	0,05	1,4	0,1	0,5	0,03
<i>Gruppi magnetici con strutture complesse</i>						
Okamura et al. (2007)	3,38	0,8	1	0	0,9	0,21
Zimm et al. (2007)	4,7	0,15	1,5	0,1	0,9	0,03

Tabella 2 - Confronto tra diversi progetti di magneti utilizzati nella refrigerazione magnetica

Infine, nella Tabella 2, si mostra che il progetto di magneti del prototipo 8MAG del Laboratorio di Tecnica del Freddo ha il miglior valore del parametro Λ_{cool} tra quelli in letteratura basati sull'architettura Halbach Array.

2.2 Sistema idraulico

L'impianto idraulico del refrigeratore magnetico oggetto di studio è composto da una valvola rotante, da due scambiatori di calore, da una pompa e dagli otto rigeneratori (oltre ai sistemi di espansione e sicurezza). Durante il periodo di tesi si è modificato in più occasioni l'impianto suddetto con l'obiettivo finale di ridurre al minimo le perdite

di carico e la presenza di aria nel circuito; pertanto la soluzione definitiva ha dato la possibilità di lavorare su un ampio range di portata di fluido. Inoltre, è stato definito il sistema sia di controllo della temperatura della sorgente calda che della simulazione del carico frigorifero.

Il componente fondamentale dell'impianto idraulico (e dell'intero prototipo) è la valvola rotante; essa è in grado di svolgere numerose funzioni, tra cui:

- trasmettere il moto ai magneti;
- regolare il flusso da e verso i rigeneratori con un'opportuna sequenza di aperture e chiusure;
- rendere continuo e monodirezionale il flusso negli scambiatori di calore.

Allo scopo di ridurre le dimensioni del dispositivo, questo componente è posto centralmente. Esso è formato da due parti: un rotore ed uno statore. Il primo è connesso direttamente al sistema magnetico, quindi, la sua frequenza di rotazione è la stessa di quella dei magneti, il secondo è rigidamente fissato sul supporto dei rigeneratori.

Dalla Figura 39 si evince come il corpo valvola sia diviso in due zone distinte: una superiore collegata alla fase di adduzione di calore (effetto frigorifero) e una inferiore legata alla reiezione di calore all'ambiente esterno. Ognuna di esse, inoltre, presenta sulla parte statorica otto aperture per il collegamento idraulico dei rigeneratori al collettore rotante, e due porte aggiuntive per collegare la valvola con gli scambiatori di calore.

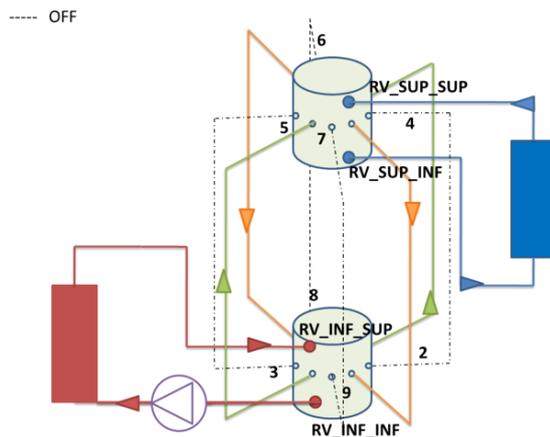


Figura 39 - Schema di funzionamento della valvola rotante dell'8MAG in una determinata posizione di riferimento

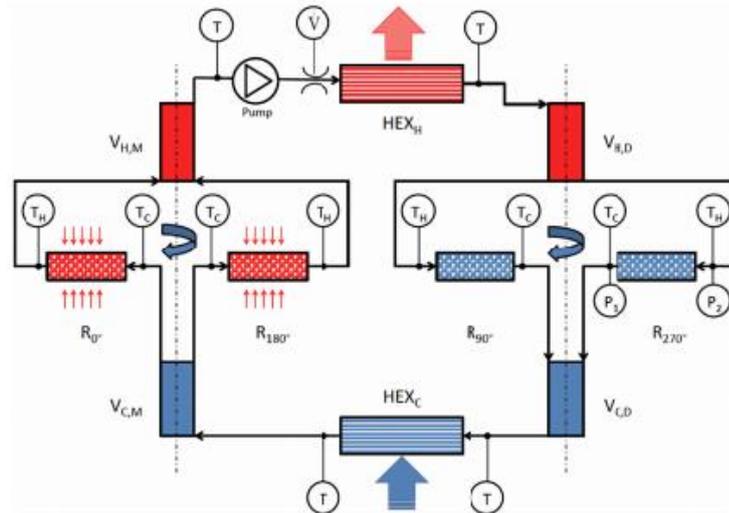


Figura 40 - Schema del circuito idraulico equivalente dell'8MAG

Facendo riferimento alla Figura 40, è possibile spiegare il funzionamento della valvola rotante nel seguente modo:

- il fluido rigenerante, mosso dalla pompa, in uscita dallo scambiatore lato caldo HEX_H raggiunge la valvola $V_{H,D}$, connessa con l'estremo caldo dei rigeneratori demagnetizzati, dove la sostanza refrigerante ha subito un abbassamento di temperatura¹⁵;
- il fluido rigenerante, attraversando i rigeneratori, si raffredda e raggiunge la valvola $V_{C,D}$, connessa con l'estremo freddo degli stessi;
- dalla suddetta valvola, il fluido va nello scambiatore lato freddo HEX_C , dove realizza l'effetto frigorifero desiderato, assorbendo calore dal carico ed aumentando, quindi, la sua temperatura;
- uscendo dallo scambiatore lato freddo, il fluido entra nella valvola $V_{C,M}$, connessa all'estremo freddo dei rigeneratori magnetizzati;
- lasciando $V_{C,M}$, il fluido attraversa i rigeneratori magnetizzati, dove la sostanza refrigerante ha subito un incremento di temperatura¹⁶, e si riscalda grazie allo scambio termico;

¹⁵ In quanto ha subito la demagnetizzazione adiabatica.

¹⁶ In quanto ha subito la magnetizzazione adiabatica.

- f) successivamente il fluido termina nella valvola $V_{H,M}$, connessa con l'estremo caldo dei rigeneratori magnetizzati, da cui poi continua il suo moto verso lo scambiatore lato caldo, dove ricomincia il ciclo.

Per il prototipo oggetto di studio viene utilizzata, come fluido rigenerante, acqua demineralizzata con l'aggiunta di inibitori di corrosione per proteggere il gadolinio [28], la quale viene spinta da una pompa a palette, che è in grado di fornire una portata volumetrica massima di 16 *l/min* a 1.6 *MPa*. Questo componente è guidato da un motore trifase a corrente alternata controllato da un inverter di frequenza, il quale consente di modificare la portata di acqua elaborata. Le tubazioni del circuito idraulico sono in polietilene, mentre i tubi che connettono i rigeneratori alla valvola rotante sono in poliammide trasparente, in maniera tale da poter osservare la presenza di aria all'interno del fluido rigenerante.

Dal lato caldo dell'apparato, è stato adottato uno scambiatore coassiale, mentre da quello freddo, è stato installato un riscaldatore elettrico.

Nel primo caso l'acqua, la cui temperatura viene ottenuta con delle resistenze elettriche gestite con un controllore PID realizzato ad hoc, viene usata come fluido secondario di scambio al fine di simulare diverse condizioni ambientali, mentre la misura del carico frigorifero viene effettuata variando la tensione di alimentazione della resistenza elettrica (quindi della potenza elettrica assorbita) dello scambiatore lato freddo.



Figura 41 - Particolare del prototipo 8Mag con evidenza degli scambiatori di calore lato caldo e lato freddo

2.3 Il rigeneratore e il Materiale Magnetocalorico (MCM)

Gli otto rigeneratori sono supportati da una struttura in alluminio (o ruota magnetocalorica) e sono disposti radialmente a 45° l'uno dall'altro. Ognuno di essi è composto da una matrice in Gadolinio (Gd), che è la sostanza magnetocalorica (MCM), da una copertura in acciaio inox, da un guscio realizzato in $PA6-G MO$ ¹⁷, da due diffusori realizzati in plexiglass e da quattro setti in poliammide bianca (Figura 42). Le dimensioni di ciascun elemento sono:

- altezza: 20 mm;
- lunghezza: 45 mm;
- larghezza: 35 mm.

Dalla Figura 42, inoltre, si possono notare i raccordi del tipo *push-to-connect* posti agli estremi del componente, montati per collegare idraulicamente quest'ultimo alla valvola rotante ed ai sensori di pressione

¹⁷ Poliammide e MoS_2 .

e temperatura.

I diffusori, posti agli estremi nella parte interna, hanno lo scopo di rendere omogenea la distribuzione del flusso del fluido rigenerante in ingresso alla matrice magnetica.

Quest'ultima presenta una configurazione *a letto di particelle*, con sfere di gadolinio con un diametro compreso nell'intervallo di $400-500 \mu m$. Ogni rigeneratore è riempito con $150 g$ di gadolinio con una porosità media di 0.35 : complessivamente, dunque, si hanno $1.20 kg$ di materiale magnetocalorico.



Figura 42 - Dettagli di un rigeneratore: 1) Guscio, 2) Diffusori, 3) MCM, 4) Attacco rapido filettato

2.4 Il sistema di movimentazione dei magneti

Il sistema di movimentazione (Tabella 3) è composto da un motore DC brushless Maxon EC60 da $400 W$ accoppiato al rotore della valvola rotante attraverso un rotismo epicicloidale con un rapporto di riduzione di $93:1$. Tale combinazione permette di ottenere una frequenza di rotazione dei magneti compresa tra $0.1 Hz$ e $1 Hz$. In aggiunta a questi due elementi, un encoder digitale ed un controllore di velocità programmabile completano il sistema di movimentazione, il quale consente una coppia continua massima di $70 Nm$ a $54 rpm^{18}$.

¹⁸ Rpm: rotations per minute.

Motore DC brushless		
<i>Tensione nominale</i>	48	V
<i>Velocità nominale</i>	4960	rpm
<i>Coppia nominale</i>	0.747	Nm
<i>Corrente nominale</i>	0.733	A
<i>Massima efficienza</i>	86	%
Rotismo epicicloidale		
<i>Numero di stadi</i>	3	/
<i>Rapporto di riduzione</i>	93:1	/
<i>Massima efficienza</i>	70	%

Tabella 3 - Dati del motore e del riduttore

CAPITOLO 3: Campagna prove sperimentali

Allo scopo di valutare le performance del refrigeratore magnetico del Laboratorio di Tecnica del Freddo, è stata condotta una campagna di prove sperimentali sulla macchina in questione.

In particolare, la serie di sperimentazioni ha preso in considerazione i parametri fondamentali che vengono utilizzati in letteratura per valutare le performance dei diversi prototipi di refrigeratore magnetico esistenti, come la frequenza, la portata di fluido rigenerante V_p , la temperatura della sorgente calda T_H , il temperature span ΔT_{span} , l'utilization factor ϕ e la coppia C_{8Mag} . Questi ultimi sono il risultato delle misure di diversi dispositivi alloggiati in diversi punti del circuito idraulico, come:

- un torsionmetro per la misura della coppia;
- un flussimetro per la misura della portata;
- delle termocoppie e termoresistenze per le misure di temperatura;
- dei trasduttori di pressione piezoelettrici per le misure di pressione.

3.1 Misura diretta e indiretta delle grandezze fisiche

La misura delle temperature in diversi punti del prototipo è stata ottenuta con due differenti sensori: micro-termocoppie di tipo T (Rame (Cu)Costantana(Cu-Ni)) e termoresistenze PT100. Le prime sono state posizionate alle uscite dei quattro rigeneratori (una coppia di ognuna per ogni rigeneratore) in contatto con il fluido di lavoro, mentre le seconde sono state inserite agli ingressi e alle uscite degli scambiatori di calore (caldo e freddo) e della valvola rotante. Il piccolo diametro della giunzione delle termocoppie, circa 0.1 mm, ha permesso una veloce lettura senza perturbare il fluido nei rigeneratori ad ogni frequenza di lavoro (la costante di tempo è pari a 0.04s). Inoltre il sensore è amagnetico, ma, essendo sia il Rame che la Costantana dei conduttori

elettrici, al fine di evitare fenomeni di correnti parassite, entrambi i fili, di conseguenza, sono stati intrecciati tra loro con passo molto piccolo lungo tutta la loro lunghezza.

Le PT100 sono state, invece, utilizzate per le parti dell'impianto prototipale con una dinamica lenta, per esempio, a regime, la temperatura di ingresso e uscita degli scambiatori è pressoché costante.

In riferimento alla Figura 43 è stato valutato, quindi:

- il *temperature span* (ΔT_{span}), inteso come la media nel tempo tra due temperature del fluido rigenerante: uscita dal lato caldo (T_{HFO}) e uscita dal lato freddo (T_{LFO}) dalla valvola rotante;
- la *temperatura della sorgente calda* (T_H), in cui secondo la trattazione classica dovrebbe essere vista come la temperatura media logaritmica tra la sorgente reale e il fluido di scambio. Nella letteratura relativa alla refrigerazione magnetica, invece, volendo prescindere dalla geometria dello scambiatore di calore e volendo riportare i dati di benchmark dei rigeneratori, la temperatura di sorgente è calcolata come la media nel tempo tra la temperatura dell'acqua di ingresso (T_{HFI}) e di uscita (T_{HFO}) del collettore inferiore della valvola rotante (Figura 39), entrambe valutate in condizioni stazionarie;
- la *temperatura della sorgente fredda* (T_C), calcolata come la media nel tempo tra la temperatura dell'acqua di ingresso (T_{LFI}) e di uscita (T_{LFO}) del collettore superiore della valvola rotante (Figura 39), entrambe valutate in condizioni stazionarie.

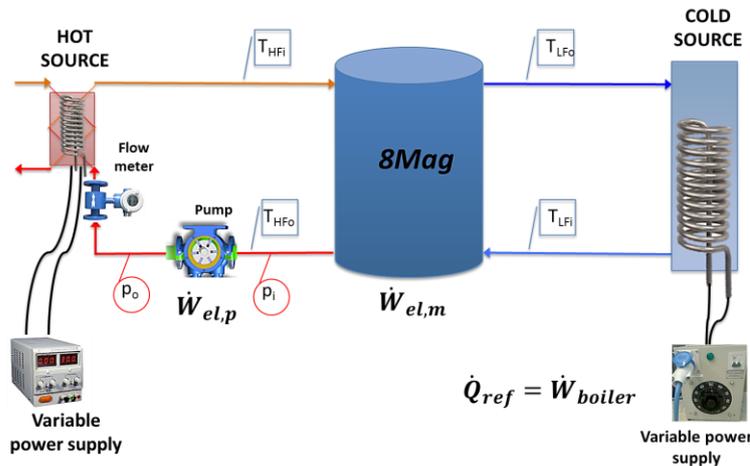


Figura 43 - Schema elementare dell'impianto sperimentale

Ai fini della misura della portata di fluido rigenerante è stato scelto un flussimetro elettromagnetico, il quale si basa sulla *legge di Faraday* o *legge dell'induzione elettromagnetica*¹⁹, montato tra la pompa e lo scambiatore coassiale.

Per ottenere le misure di pressione sono stati scelti trasduttori piezoelettrici in grado di rilevare valori di pressione compresi tra *0 e 30 bar*. Questi ultimi sono stati posizionati in due punti del circuito idraulico: 1) all'aspirazione e alla mandata della pompa al fine di misurare la prevalenza dell'intero sistema; 2) alle estremità dei rigeneratori, con l'obiettivo di misurare il tempo di attraversamento del fluido e la perdita di carico nelle diverse condizioni.

Come esposto nel paragrafo 2.4, il motore elettrico in esame ha lo scopo di movimentare il gruppo valvola-magnete ed è accoppiato, oltre a un motoriduttore in grado di ridurre di 93 volte la velocità di rotazione, anche ad un encoder e un controllore per ottenere una velocità angolare costante al variare della coppia: le proprietà ferromagnetiche del gadolinio rendono la coppia resistente di tipo discontinuo. In asse a questi ultimi è stato montato un torsiometro HMB T22 in grado di misurare coppie dinamiche o stazionarie su machine ferme e in movimento.

¹⁹ La legge di Faraday afferma che se si fa passare un corpo conduttore attraverso un campo magnetico, viene generata una forza elettromotrice nel corpo conduttore proporzionale alla velocità di spostamento.

Per il prototipo oggetto di studio è possibile distinguere tre tipologie di frequenze:

- 1) frequenza rotazionale, strettamente connessa alla velocità di rotazione del gruppo magnetico, e data dal prodotto dalla frequenza misurata dall'encoder e il rapporto di riduzione del cambio:

$$f_{\text{rot}} = \text{rpm}_{\text{motor}} \times \frac{r}{60}, \text{ con } r=1:93; \quad 65$$

- 2) frequenza ciclo singolo rigeneratore, pari alla frequenza con cui ciascun rigeneratore sperimenta un ciclo AMR completo:

$$f_{\text{AMR}} = f_{\text{rot}} \times n_{\text{magnets}}, \text{ con } n_{\text{magnets}}=2; \quad 66$$

- 3) frequenza operativa (globale), pari alla frequenza con cui l'intera macchina sperimenta un ciclo AMR completo:

$$f_{\text{op}} = f_{\text{AMR}} \times n_{\text{couple,reg}}, \text{ con } n_{\text{couple,reg}}=4. \quad 67$$

I risultati della campagna prove sperimentale (Capitolo 3.3) si riferiscono alla seconda definizione.

Un'altra grandezza che caratterizza il comportamento di un refrigeratore magnetico è l'*utilization factor*, definito come il rapporto tra la capacità termica del fluido e del solido:

$$U_f = \frac{M_f C_f}{M_{Gd} C_{Gd}}, \quad 68$$

dove M_f è la massa di fluido che attraversa il singolo rigeneratore durante un ciclo AMR, C_f è il calore specifico del fluido, M_{Gd} è la massa di Gadolinio contenuta in un rigeneratore e C_{Gd} è il calore specifico del materiale magnetocalorico a campo magnetico nullo e alla temperatura di Curie.

Riguardo al prototipo oggetto di studio possiamo affermare che:

- M_{Gd} è pari a 150g;
- C_{Gd} è uguale a 240 J/kg/K;
- C_f , essendo il fluido di lavoro acqua demineralizzata, pari a 4186 J/kg/K;

La massa di fluido che attraversa il rigeneratore, invece, non è costante ma dipende dalla frequenza di lavoro e dalla portata della pompa:

$$M_f = \int_{\vartheta_{opening}}^{\vartheta_{closed}} \rho_f \dot{V}(\vartheta) d\vartheta \quad 69$$

dove $\dot{V}(\vartheta)$ è la portata di fluido in funzione dell'angolo di rotazione ϑ , ϑ_{closed} e $\vartheta_{opening}$ sono due angoli di rotazione rispettivamente quando la luce di passaggio del fluido è completamente chiusa nel primo caso e aperta nel secondo.

Quest'ultima considerazione indica l'*utilization factor* come proporzionale alla portata che evolve nel sistema e inversamente proporzionale alla frequenza AMR:

$$U_f \sim \frac{\dot{V}}{f_{AMR}} \quad 70$$

Al fine di valutare le performance del rigeneratore è stato introdotto il *fattore di rigenerazione* [20], valutato come:

$$\delta_r = \frac{\Delta T_{AMR}}{\Delta T_{ad}} \quad 71$$

dove ΔT_{ad} è la variazione di temperatura adiabatica del MCM dovuta alla massima variazione del campo di induzione magnetica alla temperatura della sorgente esterna impostata (e stimata secondo dati presenti in letteratura [1], [17], [41]).

Per misurare la potenza frigorifera del prototipo è stata coibentata la superficie esterna del boiler elettrico, in modo da poter affermare che:

$$Q_{ref} = \dot{W}_{el,h} \quad 72$$

dove il secondo termine dell'equazione rappresenta la potenza elettrica assorbita dalla resistenza elettrica annegata all'interno dello scambiatore e misurata con un watt transducer.

Inoltre, con l'ausilio di altri due watt transducer, è stata misurata anche la potenza elettrica assorbita dalla pompa ($\dot{W}_{el,p}$) e dal motore elettrico usato per il moto del gruppo magnetico ($\dot{W}_{el,m}$); ciò ha permesso di valutare il COP del refrigeratore oggetto di studio:

$$COP = \frac{Q_{ref}}{\dot{W}_{el,m} + \dot{W}_{el,p}} \quad 73$$

Nella tabella seguente si riporta la caratteristica dei sensori utilizzati con le relative accuratezze (dichiarate dal costruttore) e l'incertezza delle misure indirette (effettuate secondo un'analisi di propagazione dell'errore in accordo con [32]).

Misura diretta o indiretta	Accuratezza	Caratteristica
Termocoppia	± 0.2 K	Tipo T
Termoresistenza	± 0.1 K	RTD PT100
Sensore di pressione	± 75 kPa	Piezoelettrico
Misuratore di portata	$\pm 0.5\%$	Elettromagnetico
Misuratore di campo magnetico	$\pm 0.4\%$	Sonda ad effetto Hall
Watt trasducer	$\pm 0.2\%$	Wattmetro elettromagnetico
Encoder	$\pm 0.01^\circ \text{ s}^{-1}$	Ottico
ΔT_{AMR}	± 0.4 K	
ΔT_{span}	± 0.2 K	
Φ	$\pm 5.3\%$	
δ_r	$\pm 4.5\%$	
M_f	$\pm 5.2\%$	
COP	$\pm 0.35\%$	

Tabella 4 - Caratteristica dei sensori utilizzati e accuratezza delle misure dirette e indirette

3.2 Il sistema di acquisizione e controllo

Le misure sperimentali sono state ottenute con un software realizzato in ambiente Labview in grado di acquisire i segnali provenienti da vari sistemi di acquisizione: CompactDAW, FieldPoint ed encoder (i primi due della National Instruments), e in grado di controllare le fonti di moto del prototipo oggetto di studio: motore del magnete e l'inverter della pompa. Riguardo a quest'ultimo aspetto, mentre nel primo caso è stato realizzato un programma ad hoc in grado di gestire il motore del magnete, nel secondo caso si è utilizzato un controllore esterno, nella fattispecie Arduino, in grado di interagire con l'inverter della pompa (nella seguente figura un particolare del circuito elettrico realizzato per tale scopo).

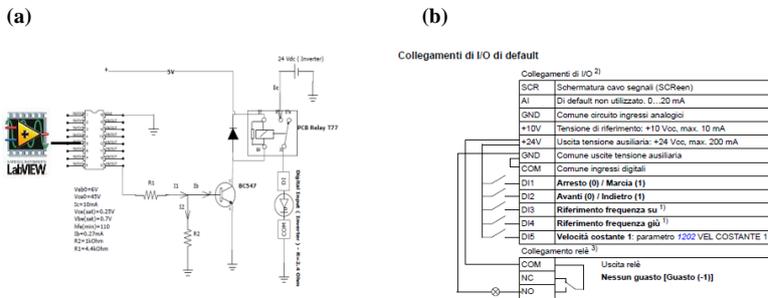


Figura 44 - (a) Schema elettrico del collegamento tra Arduino e gli ingressi dell'inverter; (b) schema elettrico dei possibili collegamenti dell'inverter (manuale d'uso)

Il software di acquisizione si basa su un progetto costituito da un programma principale (il main) e da diverse sottofunzioni, ognuna con uno specifico ruolo: acquisizione dei dati, scrittura su file, PID della pompa con Arduino, controllo del motore. Il programma così creato (Figura 45 e Figura 47) è veloce, modulare ed espandibile da nuovi utenti.

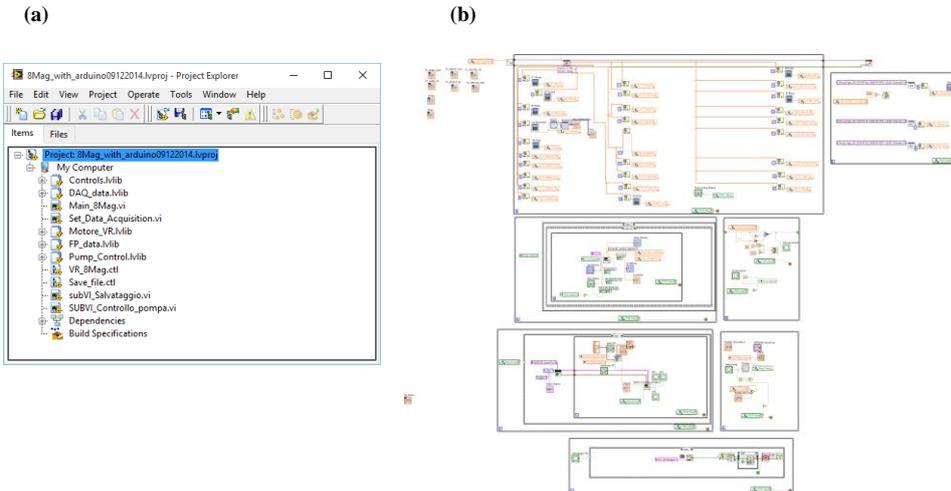


Figura 45 - (a) Finestra principale del progetto realizzato in Labview; (b) codice di calcolo del main del progetto

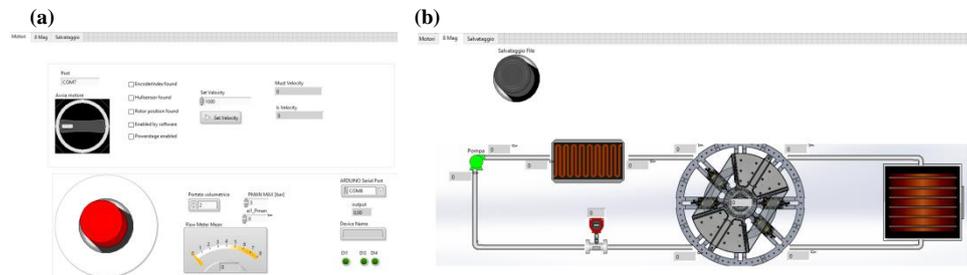


Figura 46 - (a) Particolare dell'interfaccia grafica del controllo della pompa e del motore del magnete; (b) particolare dell'interfaccia grafica di visualizzazione dei dati acquisiti

L'obiettivo della sua realizzazione è stato duplice: creare un sistema automatizzato di acquisizione dei dati e gettare le basi per la realizzazione di una sorta di centralina di controllo del refrigeratore magnetico in cui, definito l'obiettivo: massimo COP, massima Q_f etc., e in funzione dell'ambiente esterno (quindi T_H), il controllore varia le due fonti di moto: magnete e pompa, al fine di raggiungere lo scopo prestabilito.

3.3 Risultati sperimentali

La campagna prove sperimentale ha generato una mappa completa di funzionamento del prototipo oggetto di studio, da cui è stato possibile ricavare una caratterizzazione termo-fluidodinamica completa nonché i limiti e i pregi di tale innovativa tecnologia.

Partendo da una condizione di carico frigorifero nullo, per ogni frequenza AMR e per ogni portata della pompa, si è incrementato passo dopo passo il valore della temperatura della sorgente calda. Tutti i test sono stati registrati in condizioni di funzionamento stazionario: la variazione del temperature span è stata minore del valore della sua accuratezza per un tempo di almeno 300s.

Il set di dati sperimentali ottenuto è composto da una serie di 243 campioni a carico frigorifero nullo e di 225 a carico variabile, ognuno di essi scritto come una matrice 700x33 (punti per ogni sensore acquisito). La grande quantità di dati raccolti ha richiesto l'elaborazione di un programma in Matlab che raccogliesse tutte le informazioni in possesso in

un unico file, organizzato in modo che rendesse facile l'accesso nonché flessibile l'elaborazione dei dati in esso contenuti. In tal senso è stato possibile calcolare i valori medi delle variabili acquisite nonché le grandezze termodinamiche interessate (pari a 22) per ogni condizione di funzionamento.

Infine è stato generato un file Excel composto da un numero di fogli pari ai diversi valori della sorgente esterna (T_H), ognuno dei quali riporta per colonne i seguenti dati:

- portata volumetrica del fluido rigenerante V_p ;
- numero di giri del motore per la movimentazione dei magneti n ;
- utilization factor Φ ;
- carico termico sperimentale $Q_{p_fri_spe}$;
- carico termico stimato $Q_{p_fri_stimata}$;
- potenza riversata all'ambiente Q_{p_rej} ;
- potenza assorbita dalle resistenze $Pass_WT$;
- potenza assorbita dalla pompa $Pass_pump$;
- potenza assorbita dal motore per la rotazione dei magneti $Pass_8MAG$;
- coppia necessaria per mettere in rotazione i magneti $Torque$;
- caduta di pressione lungo il circuito idraulico D_p ;
- temperatura in ingresso alla valvola lato caldo $T_{in}VRHot$;
- temperatura in uscita dalla valvola lato caldo $T_{out}VRHot$;
- temperatura in ingresso alla valvola lato freddo $T_{in}VRCold$;
- temperatura in uscita dalla valvola lato freddo $T_{out}VRCold$;
- temperatura in ingresso allo scambiatore lato caldo $T_{in}HHEX$;
- temperatura in uscita dallo scambiatore lato caldo $T_{out}HHEX$;
- differenza di temperatura tra gli estremi caldo e freddo della prima coppia di rigeneratori $T_{span}R1$;
- differenza di temperatura tra gli estremi caldo e freddo della seconda coppia di rigeneratori $T_{span}R2$;
- differenza di temperatura tra gli estremi caldo e freddo della terza coppia di rigeneratori $T_{span}R3$;
- differenza di temperatura tra gli estremi caldo e freddo della quarta coppia di rigeneratori $T_{span}R4$.

3.4 Diagramma delle pressioni e Utilization Factor

La campagna prove a carico frigorifero nullo è stata un ottimo benchmark per l'architettura dell'impianto nonché fondamentale per l'individuazione delle grandezze che influiscono le performance del prototipo oggetto di studio.

In particolare i test sono stati eseguiti variando la portata di fluido da 1.5 a 7 l min⁻¹, la frequenza del ciclo AMR nel range 0.36-1.79 Hz (ovvero 0.18-0.9 Hz in riferimento alla rotazione del magnete), ottenendo valori di utilization factor in un range di 0.50-2.72, e la temperatura della sorgente calda T_H in un intervallo di valori prossimo alla Temperatura di Curie: 14-29°C.

Un risultato molto importante è stato quello di definire il valore dell'utilization factor e di individuare le fasi del ciclo Brayton nelle prove eseguite.

Dalla figura seguente si evince come, durante la fase di passaggio del fluido rigenerante, si misura una differenza di pressione tra i due estremi del rigeneratore, mentre nelle fasi adiabatiche, le guarnizioni della valvola rotante impediscono trafile di fluido verso il rigeneratore (anche se ci fossero sarebbero comunque trascurabili e non misurabili indirettamente dai traduttori di pressione).

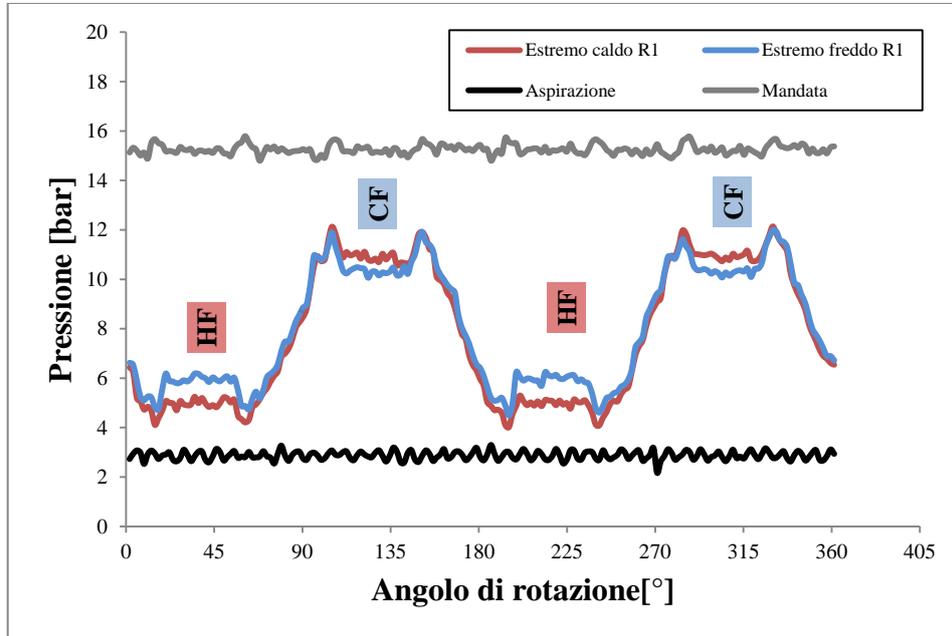


Figura 47 - Misura delle pressioni agli estremi di un rigeneratore in funzione dell'angolo di rotazione ($V_p = 7 \text{ l min}^{-1}$ - $f_{AMR} = 0.71 \text{ Hz}$)

Essendo la pompa inserita nella fase di reiezione di calore, si può affermare che la zona di bassa pressione (Figura 47) corrisponda alla fase di passaggio di fluido a campo magnetico imposto, mentre la fase parallela (induzione nulla) avvenga a valle della mandata della pompa (ad alta pressione).

Dall'analisi del diagramma delle pressioni è possibile stabilire, inoltre, i reali angoli e le rispettive rampe di apertura e chiusura della valvola rotante. In tal senso, essendo la caduta di pressione proporzionale alla portata che attraversa il rigeneratore, si può, con buona approssimazione, affermare che l'andamento della portata che attraversa il rigeneratore sia di tipo trapezoidale, con rampe di apertura e di chiusura pari a 5° e grado di apertura totale di 45° . Quindi, applicando l'equazione 6, è possibile calcolare sia la quantità di fluido che attraversa il rigeneratore che l'utilization factor, entrambi in funzione del regime di rotazione della portata della pompa e della frequenza ciclo AMR:

$$M_f = \int_{\vartheta_{opening}}^{\vartheta_{closed}} \rho_f \dot{V}(\vartheta) d\vartheta = \frac{50 \dot{V}_{pump}}{27 f_{AMR}} [g] \quad 74$$

$$U_f = 0.1357 \frac{\dot{V}_{pump}}{f_{AMR}} \quad 75$$

3.5 Temperature span e fattore di rigenerazione

La letteratura [20], [28], [40], [43] riporta che il valore dell'utilization factor ottimale è prossimo a 0.5 e che valori maggiori di quest'ultimo abbiano un impatto negativo sulle performance del temperature span oltre al raggiungimento del suo massimo per bassi valori della temperatura della sorgente calda. Infatti, come si evince dalla Figura 48, il fattore di rigenerazione del prototipo oggetto di studio è costante fino a utilization factor pari a 1.8, per poi decrescere rapidamente. Questo risultato è in linea con quanto presente in letteratura, confermando come la migliore rigenerazione si ha con piccoli utilization.

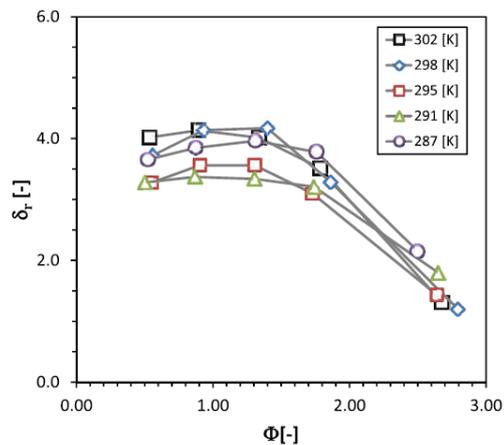


Figura 48 - Fattore di rigenerazione in funzione dell'utilization factor per differenti temperature della sorgente calda con portata pari a 7 l min⁻¹

Tuttavia l'attuale architettura del prototipo oggetto di studio presenta ampi volumi morti, infatti una quota parte del fluido spostato da e verso i rigeneratori è quella che resta intrappolata tra questi ultimi e la valvola

rotante; infatti, come si evince dalla figura seguente, il massimo ΔT_{AMR} per il prototipo oggetto di studio si è ottenuto, nelle diverse condizioni, con Φ intorno a 1.

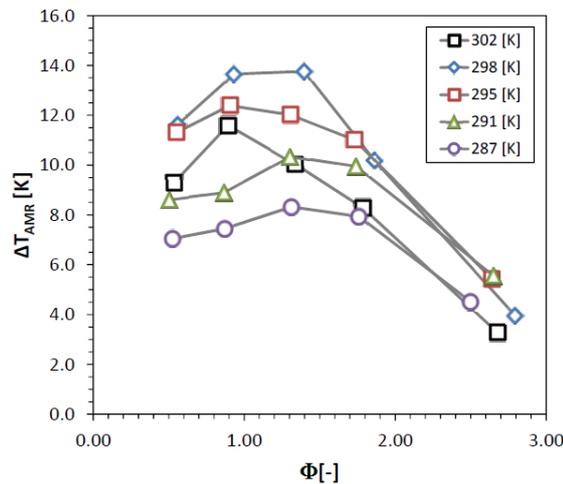


Figura 49 – ΔT_{AMR} in funzione dell'utilization factor per diverse temperature della sorgente calda con portata pari a 7 l min^{-1}

3.6 I volumi morti

L'architettura attuale del circuito idraulico di *8Mag* (Figura 39 e Figura 40), prevede che, durante la fase di scambio termico a campo magnetico nullo, il fluido, partito dal collettore inferiore, giunge all'estremità "calda" del rigeneratore, attraversa quest'ultimo (formato dai due diffusori e il Gadolinio), e arriva alla sezione superiore della valvola rotante. Nella fase parallela con campo magnetico imposto, l'acqua, che svolge lo stesso percorso, attraverso i medesimi componenti, ma nel verso opposto, incontra una quantità di fluido rimasta intrappolata tra i due collettori della valvola rotante della fase precedente.

L'effetto di questa quantità di acqua, definita *volume morto*, è duplice: massime prestazioni termodinamiche con un utilization factor circa il doppio di quello nominale e campi di temperatura durante lo scambio termico fluido-solido non di progetto.

In tal senso è stata calcolata la quantità di fluido presente tra il Gadolinio e la valvola rotante: somma tra l'acqua contenuta nei diffusori

e nei tubi, sia per l'estremo caldo ($V_{m_{cold}}$) che per quello freddo ($V_{m_{cold}}$); inoltre, lavorare con utilization intorno a 1 significa spostare ad ogni fase del ciclo circa 12 cm^3 di fluido (V_{sp}). Come si evince dalle tabelle seguenti, per una determinata prova sperimentale, il massimo ΔT_{span} si ottiene con un rapporto tra il volume di fluido spazzato e quello rimasto intrappolato circa pari a 2. Tale analisi avvalora l'ipotesi che l'architettura del prototipo oggetto di studio debba spostare ad ogni ciclo AMR una quantità di acqua doppia rispetto alle condizioni nominali per raggiungere le massime prestazioni. In tal senso, potendo eliminare i volumi morti, il prototipo dovrebbe lavorare con un volume spazzato pari a quello intrappolato nei tubi e quindi con capacità termica del fluido circa la metà di quella del solido; di conseguenza, il primo dovrebbe sperimentare nello scambio termico salti di temperatura ancora maggiori.

Infine è interessante notare dalle medesime tabelle (Tabella 5 e Tabella 6), come per bassi utilization factor la massa di fluido spostata è inferiore a quella rimasta intrappolata dalla fase precedente, al contrario, per alti valori di Φ , la massa di fluido spostata è notevolmente maggiore rispetto quella contenuta nel tubo e nel diffusore.

V_p	n	f_{AMR}	T_H	Φ	ΔT_{span}	$V_{sp}/V_{m_{cold}}$	$V_{sp}/V_{m_{hot}}$
7	1 000	0,36	29	2,72	2,62	6,84	4,64
7	1 500	0,54	29	1,81	6,51	4,56	3,09
7	2 000	0,72	29	1,36	8,20	3,42	2,32
7	2 500	0,90	29	1,09	8,45	2,74	1,86
7	3 000	1,08	29	0,91	8,86	2,28	1,55
7	3 500	1,25	29	0,78	7,97	1,95	1,33
7	4 000	1,43	29	0,68	7,91	1,71	1,16
7	4 500	1,61	29	0,60	7,29	1,52	1,03
7	5 000	1,79	29	0,54	6,64	1,37	0,93

Tabella 5 - Relazione tra i volumi morti e il massimo ΔT_{span} - Temperature della sorgente calda pari a 29°C

V_p	n	f_{AMR}	T_H	Φ	ΔT_{span}	$V_{sp}/V_{m_{cold}}$	$V_{sp}/V_{m_{hot}}$
5	714	0,26	23	2,72	3,13	6,84	4,64
5	1 070	0,38	23	1,82	8,11	4,57	3,10
5	1 434	0,51	23	1,36	10,33	3,41	2,31
5	2 153	0,77	23	0,90	10,85	2,27	1,54
5	3 574	1,28	23	0,54	9,54	1,37	0,93

Tabella 6 - Relazione tra i volumi morti e il massimo ΔT_{span} - Temperature della sorgente calda pari a 23°

Nella Figura 50 viene mostrato il profilo di temperatura e pressione di

una prova sperimentale svolta. Come è possibile notare, durante le due fasi di passaggio di fluido, l'acqua che entra all'estremo di un rigeneratore non ha la temperatura del fluido proveniente dalla valvola rotante, ma, inizialmente, deve essere spazzato un volume di fluido con un livello termico caratteristico della fase precedente. In tal senso, il prototipo oggetto di studio lavora con livelli termici diversi da quelli di progetto.

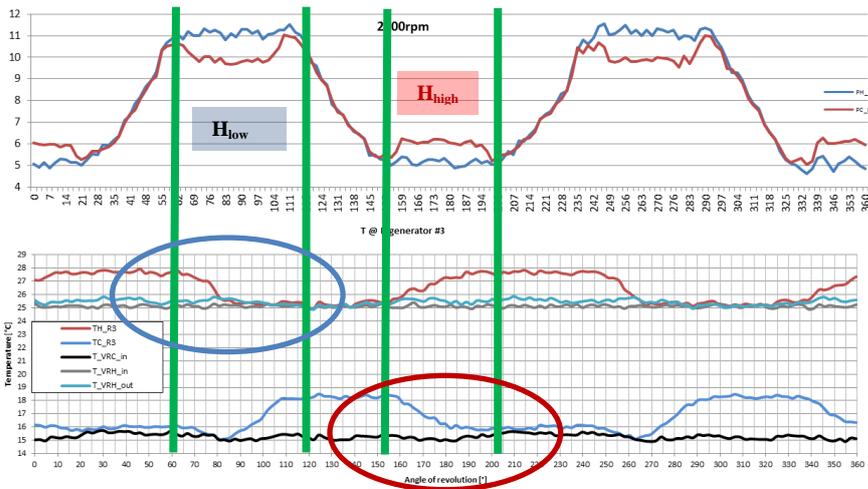


Figura 50 - Profilo di temperatura e pressione ($f_{AMR}=0.9$ Hz, $V_p=7$ l min^{-1} e T_h pari a 25°C)

3.7 Analisi della coppia e introduzione del PVP (Paramagnetic Volume Percentage)

La campagna prove sperimentale ha evidenziato ulteriori interessanti proprietà dell'architettura prototipale oggetto di studio, tra cui la variazione della coppia con la frequenza di rotazione del magnete e della temperatura della sorgente calda (Figura 51). L'aumento della coppia a fronte dell'aumento della frequenza ciclo e quindi della velocità di rotazione, è dovuta principalmente all'aumento delle correnti indotte sulle parti in alluminio e che sappiamo essere direttamente proporzionali alla frequenza di variazione del campo magnetico, così come gli effetti degli attriti. Infatti, il supporto dei rigeneratori nel traferro è una ruota di alluminio. E' possibile, però, notare anche una certa variazione della

coppia rispetto alla temperatura T_H per una fissata frequenza di rotazione.

Riguardo a quest'ultimo aspetto, dalla Figura 51, si evincono due comportamenti interessanti: la differenza tra le due iso-frequenze che producono la coppia massima e minima è pressappoco costante al variare di T_H , e questa variazione è contenuta in appena 5 Nm. In conclusione si può affermare come l'incremento di coppia sia connesso principalmente all'aumento della frequenza e, quindi, di come siano importanti gli effetti dissipativi: correnti parassite ed attriti di rotazione (cuscinetti) nel prototipo oggetto di studio.

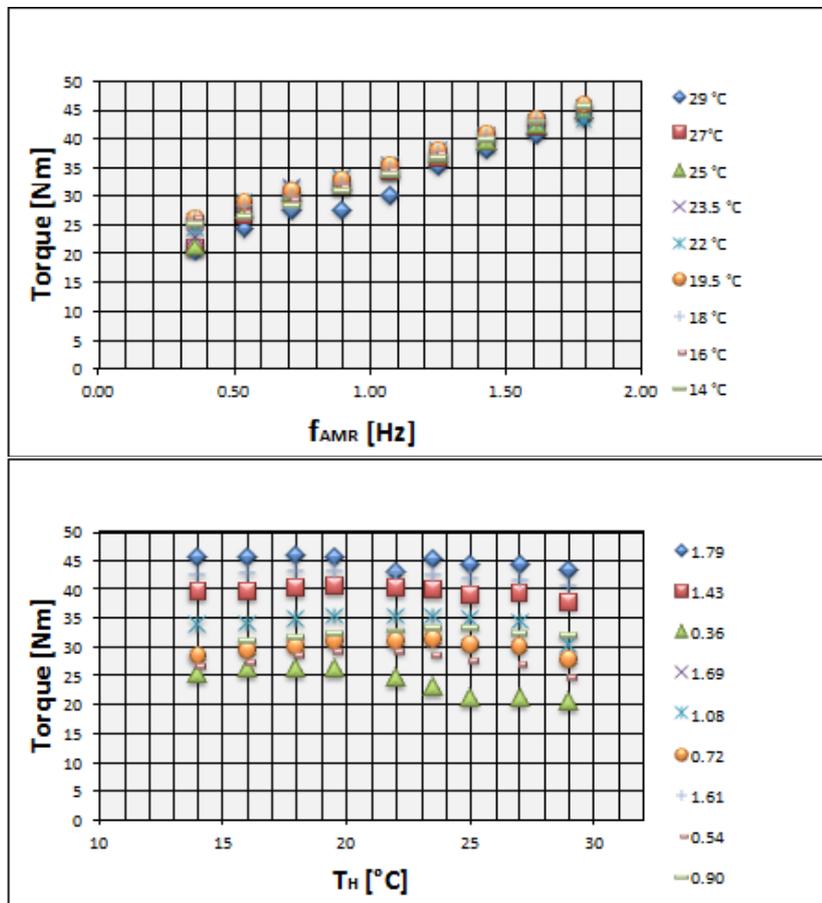


Figura 51 – a) Coppia media al variare della frequenza AMR parametrizzata per T_h , Q_f nullo, 71 min^{-1} ;
 b) Coppia media al variare di T_h , parametrizzata della frequenza AMR, Q_f nullo, 71 min^{-1} .

La variazione della coppia con la temperatura della sorgente esterna

assomiglia molto ad una spezzata: ha un primo tratto orizzontale e un secondo obliquo; dato che ciò accade proprio nell'intorno della temperatura di Curie del Gadolinio, si è cercato di correlare tale proprietà termofisica del materiale alla variazione della coppia a frequenza fissata.

Per fare ciò è stato introdotto il concetto di percentuale di volume paramagnetico per il rigeneratore (Paramagnetic volume percentage).

In tal senso si supponga di poter confondere la temperatura di uscita ed ingresso dell'acqua dal rigeneratore con la temperatura, rispettivamente, dell'estremo freddo (T_C) e caldo (T_H) dello stesso ed, inoltre, si ipotizzi un profilo di temperatura lineare della sostanza magnetica.

Sotto queste ipotesi, è possibile definire per ogni punto sperimentale il profilo di temperatura del rigeneratore ed osservare se in esso ricada o meno la temperatura di Curie (T_{Curie}). In particolare, dato che il Gd è un materiale del secondo ordine, se nell'intervallo di temperatura tra estremo caldo ed estremo freddo ricade la temperatura di Curie, allora il materiale sarà caratterizzato da una porzione di volume con caratteristiche ferromagnetiche e da un'altra con caratteristiche paramagnetiche.

Da quest'ultima considerazione nasce il concetto di Paramagnetic Volume Percentage (PVP), ovvero la percentuale di volume paramagnetico della sostanza refrigerante, definito come segue:

$$PVP = \frac{T_{Curie} - T_H}{T_C - T_H} * 100 \quad 76$$

con $PVP = 100\%$ se $PVP \geq 100\%$ e $PVP = 0\%$ se $PVP \leq 0\%$.

Per come è stato formulato, tale indice restituisce tre differenti scenari:

- $PVP=100\%$: il rigeneratore si comporta completamente come sostanza paramagnetica (regione paramagnetica);
- $PVP=0\%$: il rigeneratore si comporta completamente come sostanza ferromagnetica (regione ferromagnetica);
- $0\% \leq PVP \leq 100\%$: il rigeneratore è caratterizzato da una percentuale di volume paramagnetico, data dal PVP, e da un'altra porzione che si comporta come materiale ferromagnetico, pari a $1-PVP/100$; si tratta, dunque, di una *regione a fase mista*.

I dati sperimentali della Figura 51 hanno fornito anche i valori del ΔT_{span} , dai quali è stato possibile calcolare la temperatura dell'estremo freddo T_C dall'equazione seguente, nonché il PVP:

$$T_C = T_H - \Delta T_{span}^{20}.$$

Il risultato di tale analisi è riportato nella Figura 52 dove è possibile contraddistinguere due zone ben distinte tra esse: una in cui il PVP assume sempre valore nullo (F-zone) e una in cui il PVP varia fino al raggiungimento del valore unitario (Mix-zone). Dal confronto del comportamento della coppia nelle due zone si osserva che nella F-zone la coppia è approssimativamente invariante rispetto alla temperatura T_H , mentre nella Mix-zone, la T_H ha una influenza lineare con valori minimi per PVP più alti. In conclusione la variazione della coppia al variare della temperatura della sorgente calda è ottenuta solo nel caso la temperatura di Curie ricade all'interno del rigeneratore (Mix-zone).

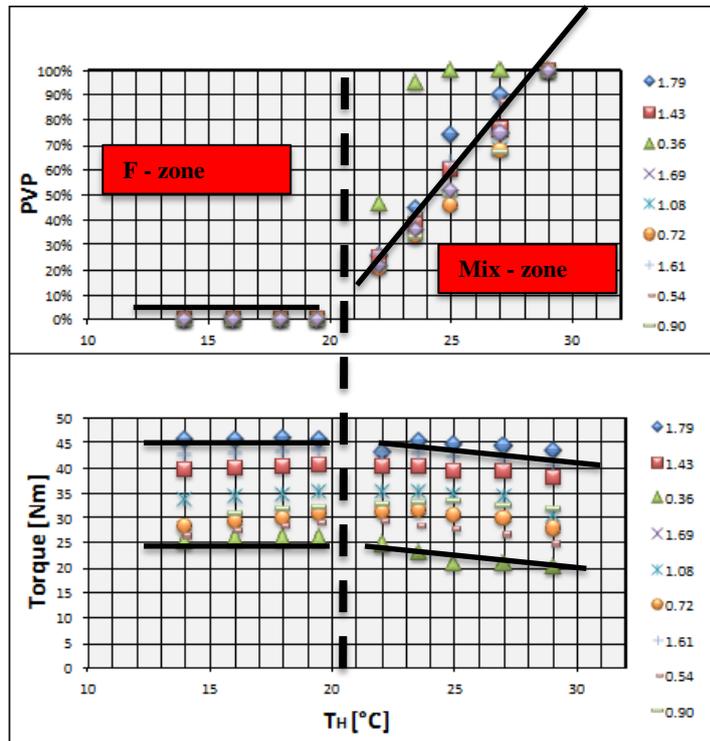


Figura 52 - Correlazione tra il PVP e la variazione della coppia

Da quest'ultima considerazione e dal calcolo del PVP è stata

²⁰ Si ricordi la definizione del temperature span fornita nel paragrafo 3.1

introdotta un'interessante osservazione. In particolare la letteratura indica che per ottimizzare il ΔT_{span} bisogna far ricadere la temperatura di Curie all'interno del profilo di funzionamento del rigeneratore. Nulla è stato definito in termini di posizione relativa al profilo stesso, ovvero, se tale temperatura debba essere raggiunta al centro anziché a uno dei due estremi del rigeneratore. Tale osservazione è tanto più sentita se si vogliono prendere in considerazione dei rigeneratori multilayer. Con l'introduzione del PVP è stato possibile confrontare quest'ultima grandezza con la variazione del ΔT_{span} in funzione di T_H . Infatti, come si evince dalla Figura 53, incrociando la zona degli ottimi in termini di T_H e di PVP, si vede come il ΔT_{span} viene ottimizzato allorquando il rigeneratore ha una percentuale di volume paramagnetico compresa tra il 30% e il 60%, ovvero la temperatura di Curie è localizzabile nell'intervallo 30-60% della posizione assiale del flusso all'interno del rigeneratore.

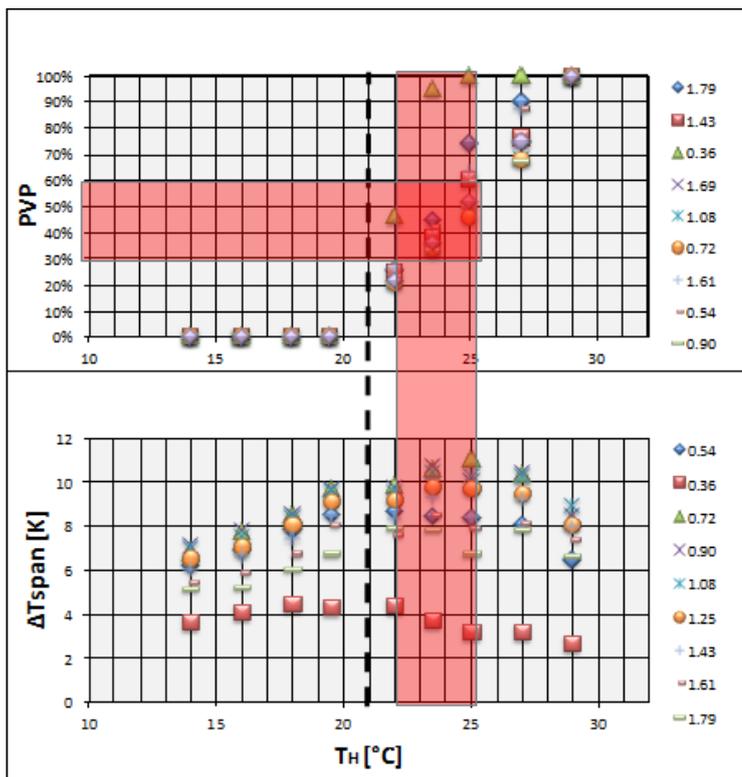


Figura 53 - Effetto del PVP sul ΔT_{span}

3.8 Curve parametriche: influenza del carico frigorifero sul temperature span

Durante gli esperimenti è stato osservato l'andamento del temperature span in funzione della temperatura della sorgente calda per diversi carichi frigoriferi, confrontandolo con altri prototipi presenti in letteratura.

Nella tabella seguente vengono riportati alcuni dei più importanti prototipi di refrigeratore magnetico a magneti permanenti rotanti (RO) e alternativi (RE) presenti in letteratura.

Gruppo di ricerca	Config.	B [T]	MCM [g]	MCM	f_{AMR}	\dot{Q}_{fr}	ΔT_{AMR}	COP
Università di Victoria [11][18][19][43]	RO	1.47	110	Gd	0.6	0	29.0	1.6
		1.47	110	Gd	1.4	50	2.5	
Astronautics Corporation [37][48][49][50]	RO	1.5	260	Gd	0.5	15	14	
	RO	1.5	890	Gd	4.7	844	0	
Laboratorio Risø Danimarca [13][21][22][14][28][29]	RO	1.2	1700	Gd	4.0	400	8.9	1.8
	RE	1.03	78.2	Gd	0.13	0	10.2	3.1
Tokyo Tech [25][26][33][34]	RO	1.1	1000	Gd	0.5	560	8	1.8
						244	8	2.4
Università della Svizzera Ovest [15]	RE	1.45	800	Gd	0.5	0	22	
Università della Ljubljana [44]	RE	1.15	176	Gd	0.3	0	19.5	
Università di Salerno (LTF) [8][9]	RO	1.25	920	Gd	0.77	0	10.8	0
					0.54	300	0	1.6

Tabella 7 - Sommario di alcuni prototipi di refrigeratore magnetico presenti in letteratura

In particolare, come si evince dalla tabella suesposta, si nota come le performance del prototipo oggetto di studio (Figura 54) sono inferiori ad alcuni dati presenti in letteratura. Tale comportamento è dovuto principalmente a due fattori tipici di "8Mag": la presenza di un carico intrinseco alla macchina stessa (assenza di coibentazione del sistema) e l'influenza sulle prestazioni dei volumi morti.

In generale, in letteratura, a parte qualche eccezione (Università di Vittoria BC, Astronautics Corporation e Laboratorio Risø della Danimarca), si mostrano risultati sperimentali caratterizzati da piccoli

carichi frigoriferi, ridotti COP e basse frequenze di lavoro. Tuttavia, le macchine costruite fino ad ora non possono essere commercializzate per gli elevati costi di produzione e l'alto rapporto tra le dimensioni e la potenza frigorifera.

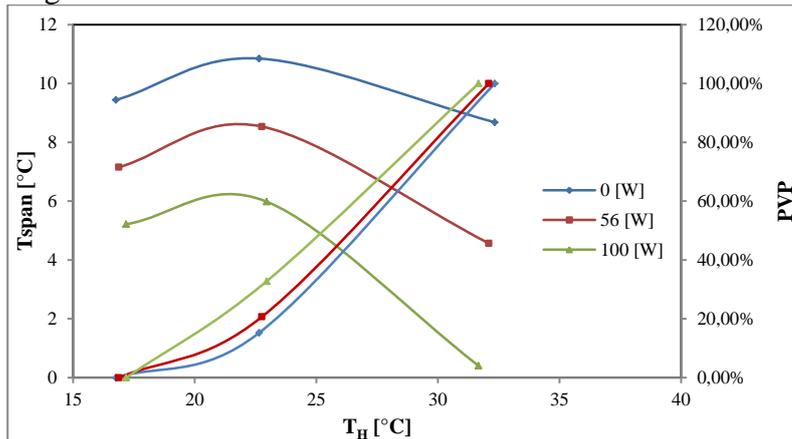


Figura 54 - Temperature span in funzione di Th per 0, 56 e 100W. Test eseguito a 0.77 Hz e utilization 0.86

Nel paragrafo 3.5 si è anticipato come il prototipo oggetto di studio lavori lontano dalle condizioni di progetto, ottenendo il suo massimo temperature span con utilization factor intorno a 1. Dalla figura seguente si nota come quest'ultimo, inoltre, all'aumentare del carico, si sposti verso valori crescenti.

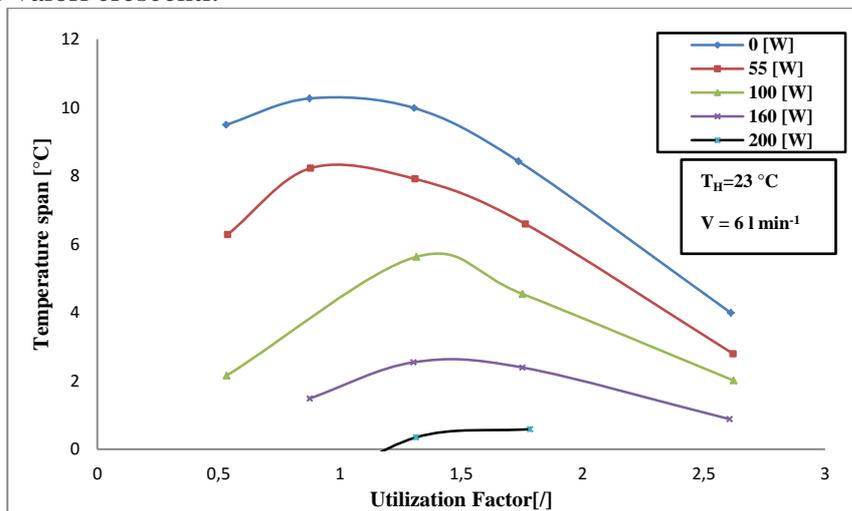


Figura 55 - Temperature span in funzione dell'utilization factor al variare del carico frigorifero

La Figura 55 mostra anche che, al variare dell'utilization, il ΔT_{span} segue un andamento prima crescente e poi decrescente. Tale comportamento è stato analizzato nel dettaglio fissando il valore della portata.

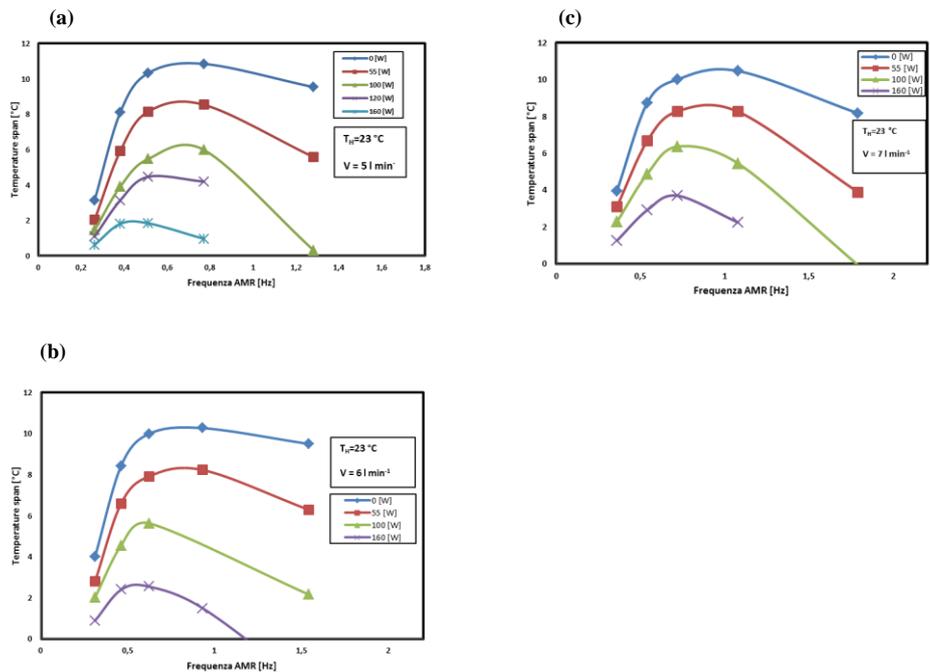


Figura 56 - (a,b,c) ΔT_{span} in funzione di f_{AMR} per differenti carichi frigoriferi e differenti portate d fluido

La Figura 56 mostra il ΔT_{span} in funzione di f_{AMR} per differenti carichi frigoriferi, alla temperatura T_H pari a 23°C e per tre differenti portate di fluido: 5.0 , 6.0 e 7.0 l min^{-1} . La figura mostra chiaramente come, fissato il carico, il temperature span ha un andamento quadratico al variare della frequenza. Come osservato da Lozano et. al. (2014) [29], questo fenomeno avviene poiché alle basse frequenze di lavoro c'è una grande influenza della conduzione termica longitudinale e l'utilization factor del rigeneratore diventa troppo grande. Tuttavia, è possibile notare che a basse frequenze il temperature span aumenta fino a raggiungere un valore massimo; superato quest'ultimo, i fattori di perdita (come l'attrito della valvola rotante, la maldistribuzione del fluido durante la rotazione di

quest'ultima) e i volumi morti diventano significanti e si ha un'inefficienza nello scambio termico; quindi, il rigeneratore non è più in grado di sperimentare alti salti di temperatura. Alle alte frequenze, invece, il fluido non è in grado di raccogliere tutta l'energia resa disponibile dall'effetto magnetocalorico, ottenendo, quindi, bassi valori di ΔT_{span} .

Durante gli esperimenti è stato osservato che per ogni portata di fluido la frequenza ciclo ottima (che massimizza il ΔT_{span}) diminuisce all'aumentare del carico frigorifero. E' possibile spiegare tale fenomeno considerando che, fissando la portata di fluido e diminuendo la f_{AMR} , si ha un incremento della massa di acqua che attraversa il rigeneratore. Ciò porta a un aumento dell'utilizzazione factor, di conseguenza, la macchina può assorbire una quantità maggiore di energia.

Un'ultima considerazione riguarda il PVP.

Le prove sperimentali mostrate in Figura 56 hanno in comune una temperatura della sorgente calda fissa e maggiore di quella di Curie, di conseguenza il PVP è maggiore di zero (il materiale non può essere solo paramagnetico). Fissato T_H , un aumento del carico frigorifero porta a un incremento della temperatura della sorgente fredda, di conseguenza a un aumento del PVP. Come mostrato nelle tabelle seguenti, fissata la portata e T_H , all'aumentare del carico frigorifero aumenta il PVP e diminuisce il ΔT_{span}

V_p [l min ⁻¹]	f_{AMR} [Hz]	Φ [l]	ΔT_{span} [°C]	Q_{fr} [W]	T_H [°C]	T_C [°C]	PVP [%]
5,1	0,8	0,9	10,8	0,0	22,7	11,8	15%
5,1	0,8	0,9	8,5	57,0	22,8	14,2	21%
5,0	0,8	0,9	6,0	99,6	23,0	17,0	33%
4,9	0,5	1,3	1,8	163,8	23,1	21,3	100%
5,0	0,4	1,8	0,0	202,0	23,0	23,1	100%

Tabella 8 - Valori del temperature span al variare della frequenza e del carico frigorifero. $V_p=5$ l min⁻¹, $T_H=23^\circ\text{C}$

V_p [l min ⁻¹]	f_{AMR} [Hz]	Φ [l]	ΔT_{span} [°C]	Q_{fr} [W]	T_H [°C]	T_C [°C]	PVP [%]
6,0	0,9	0,9	10,3	0,0	22,8	12,5	17%
6,0	0,9	0,9	8,2	57,0	23,0	14,8	25%
6,0	0,6	1,3	5,6	100,2	23,0	17,4	36%
5,9	0,6	1,3	2,5	165,0	23,0	20,5	80%
6,0	0,5	1,8	0,6	201,2	23,2	22,6	100%

Tabella 9 - Valori del temperature span al variare della frequenza e del carico frigorifero. $V_p=6$ l min⁻¹, $T_H=23^\circ\text{C}$

V_p [l min ⁻¹]	f_{AMR} [Hz]	Φ [°]	ΔT_{span} [°C]	Q_{fr} [W]	T_H [°C]	T_C [°C]	PVP [%]
7,0	1,1	0,9	10,5	0,0	22,7	12,3	17%
6,9	0,7	1,3	8,3	57,1	23,0	14,8	25%
7,0	0,7	1,3	6,4	100,2	23,1	16,7	33%
7,0	0,7	1,3	3,7	148,8	22,8	19,1	49%
7,0	0,5	1,8	1,2	202,5	23,5	22,4	100%

Tabella 10 - Valori del temperature span al variare della frequenza e del carico frigorifero. $V_p=7$ l min⁻¹, $T_H=23^\circ\text{C}$

3.9 Analisi del temperature span in funzione del carico frigorifero

Dopo aver interpretato la curva caratteristica del temperature span rispetto alla frequenza ciclo, della temperatura della sorgente calda e dell'utilization factor, si è voluto osservare la variazione della stessa grandezza con il carico frigorifero. A tale scopo sono state fissate tre diverse portate di fluido: 5.0, 6.0 e 7.0 l min⁻¹ e la temperatura T_H pari a 23°C, mentre è stata variata la frequenza ciclo. Nelle tabelle seguenti si riportano i risultati sperimentali ottenuti con il primo valore di portata su indicato, in quanto le osservazioni sui risultati ottenuti si ripetono anche per le altre prove svolte.

f_{AMR} [Hz]	Φ [°]	ΔT_{span} [°C]	Q_{fr} [W]	PVP [%]
0,26	2,6	3,1	0,0	43%
0,26	2,7	2,0	56,9	77%
0,26	2,7	1,4	100,5	100%
0,26	2,7	1,1	120,1	100%
0,26	2,7	0,6	163,4	100%

Tabella 11 - Valori del temperature ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero con $f_{AMR}=0.26$ Hz e $T_H=23^\circ\text{C}$

f_{AMR} [Hz]	Φ [l]	ΔT_{span} [°C]	Q_{fr} [W]	PVP [%]
0,38	1,8	8,1	0,0	20%
0,38	1,8	5,9	55,0	25%
0,38	1,8	3,9	99,4	47%
0,38	1,8	3,1	120,0	58%
0,38	1,8	1,8	149,0	100%

Tabella 12 - Valori del temperature ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero con $f_{AMR}=0.38\text{Hz}$ e $T_H=23^\circ\text{C}$

f_{AMR} [Hz]	Φ [l]	ΔT_{span} [°C]	Q_{fr} [W]	PVP [%]
0,51	1,3	10,3	0,0	17%
0,51	1,3	8,2	56,8	20%
0,51	1,3	5,5	100,0	34%
0,51	1,3	4,5	120,3	46%
0,51	1,3	1,8	163,8	100%

Tabella 13 - Valori del temperature spa ΔT_{span} n in funzione del carico frigorifero con $f_{AMR}=0.51\text{Hz}$ e $T_H=23^\circ\text{C}$

f_{AMR} [Hz]	Φ [l]	ΔT_{span} [°C]	Q_{fr} [W]	PVP [%]
0,77	0,9	10,8	0,0	15%
0,77	0,9	8,5	57,0	21%
0,77	0,9	6,0	99,6	33%
0,77	0,9	4,2	120,4	53%
0,77	0,9	1,0	165,1	100%

Tabella 14 - Valori del temperature ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero con $f_{AMR}=0.77\text{Hz}$ e $T_H=23^\circ\text{C}$

f_{AMR} [Hz]	Φ [l]	ΔT_{span} [°C]	Q_{fr} [W]	PVP [%]
1,28	0,5	9,5	0,0	20%
1,28	0,5	5,6	56,2	35%
1,28	0,5	0,3	100,0	100%

Tabella 15 - Valori del temperature ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero con $f_{AMR}=1.28\text{Hz}$ e $T_H=23^\circ\text{C}$

Dalla figura seguente si mostra chiaramente che, fissata la frequenza ciclo, il ΔT_{span} decresce linearmente all'aumentare del carico frigorifero. Questo comportamento, in accordo con altri lavori (Lozano et. Al, 2014; Tura e Rowe, 2011; Tůsek et al., 2013), è dovuto all'applicazione del carico frigorifero all'estremo freddo del rigeneratore. Il massimo

temperature span ottenuto a carico nullo rispettivamente per le tre portate è stato di 10.9°C (con $f_{AMR}=0.77$ Hz e $\dot{V}=5$ l min⁻¹), 11.9 °C (con $f_{AMR}=0.93$ Hz e $\dot{V}=6$ l min⁻¹) e 10.5°C (con $f_{AMR}=1.08$ Hz e $\dot{V}=7$ l min⁻¹). Il carico frigorifero massimo raggiunto da 8Mag in corrispondenza di ΔT_{span} prossimo a zero è stato di circa 200W.

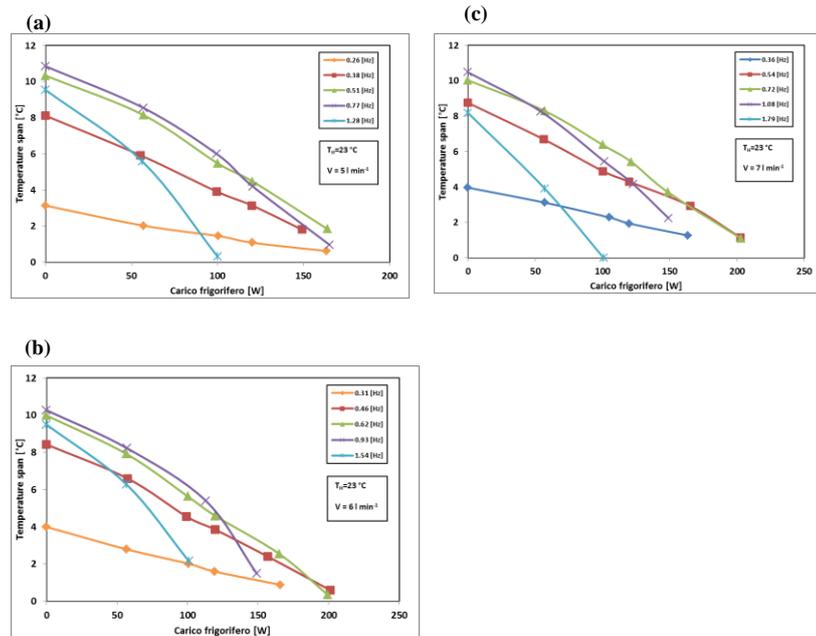


Figura 57 – (a,b,c) ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero per differenti frequenze ciclo e portate con $T_H=23^\circ\text{C}$

Nel precedente paragrafo si è osservato come, a parità di carico frigorifero (con portata e temperatura della sorgente calda fissate), si ottengono due valori del salto di temperatura con due rispettive diverse frequenze ciclo. Tale comportamento si ripropone nella Figura 57, ma, a differenza dei precedenti diagrammi, in quest'ultima si può notare come le curve iso-frequenza si intersecano tra di loro. E' possibile spiegare questo comportamento ricorrendo in primo luogo al PVP. Dal test a 5 l min⁻¹ (con tabelle su riportate), sono state confrontate due prove: 0.38Hz e 1.28Hz; mentre queste ultime a 50W hanno un PVP basso: 0.22% a 0.38Hz e 32% a 1.28Hz, a 100W la prima ha un PVP del 50% mentre la seconda è già del 100%; pertanto a quest'ultima decadono rapidamente le prestazioni. Avendo fissato la temperatura dell'estremo caldo del

rigeneratore, la temperatura di quello freddo dipende dal carico termico applicato. Le due prove su citate, a parità di queste due grandezze, hanno mostrato due differenti andamenti. In tal senso un'altra importante differenza tra le due prove è il valore dell'utilization factor; la prova a 0.38Hz ha un Φ molto alto rispetto all'altra; di conseguenza all'interno del rigeneratore fluisce una maggiore quantità di fluido in grado di assorbire l'energia termica dell'ambiente esterno.

Lo stesso fenomeno accade con altre coppie di prove: 1.28 e 0.77 Hz ad esempio, in cui mentre la prima a 100W decadono le prestazioni (avendo un PVP del 100%), la seconda raggiunge la condizione di volume paramagnetico a 160W.

Infine, la prova a 0.26 Hz ha una pendenza pressoché costante, infatti già dopo 50W il materiale è completamente paramagnetico

Un ultimo importante studio sui test effettuati, è stato osservare l'andamento del carico frigorifero in funzione del temperature span per diverse coppie di portata e regime di rotazione che diano lo stesso utilization factor.

Nelle tabelle seguenti vengono riportati i diversi valori di portata e numero di giri che hanno condotto a un ϕ pari a 1.76 con una temperatura della sorgente calda pari a 23°C.

V_p [l min ⁻¹]	n [rpm]	f_{AMR} [Hz]	Φ [/]	ΔT_{span} [°C]	Q_{fr} [W]	T_H [°C]
5,0	1 070	0,38	1,76	8,1	0,0	22,6
5,0	1 070	0,38	1,78	5,9	55,0	22,5
4,9	1 070	0,38	1,75	3,9	99,4	22,8
5,1	1 070	0,38	1,80	3,1	120,0	22,8
5,1	1 070	0,38	1,79	1,8	149,0	23,0
5,0	1 070	0,38	1,78	0,0	202,0	23,0

Tabella 16 - Valori del COP in funzione del Δt_{span} con $\Phi=1.76$ (5,0,38) e $T_H=23^\circ\text{C}$

V_p [l min ⁻¹]	n [rpm]	f_{AMR} [Hz]	Φ [/]	ΔT_{span} [°C]	Q_{fr} [W]	T_H [°C]
5,9	1 283	0,46	1,74	8,4	0,0	22,9
6,0	1 283	0,46	1,76	6,6	57,6	23,1
5,9	1 283	0,46	1,75	4,5	99,4	22,8
6,0	1 283	0,46	1,76	3,8	119,7	23,0
5,9	1 283	0,46	1,75	2,4	157,0	23,0
6,0	1 283	0,46	1,78	0,6	201,2	23,2

Tabella 17 - Valori del COP in funzione del Δt_{span} con $\Phi=1.76$ (6,0,46) e $T_H=23^\circ\text{C}$

V_p [l min ⁻¹]	n [rpm]	f_{AMR} [Hz]	Φ [/]	ΔT_{span} [°C]	Q_{fr} [W]	T_H [°C]
7,0	1 500	0,54	1,76	8,8	0,0	22,9
6,9	1 500	0,54	1,74	6,7	56,5	23,0
7,0	1 500	0,54	1,76	4,9	100,4	23,0
7,0	1 500	0,54	1,76	4,3	119,9	23,0
7,0	1 500	0,54	1,76	2,9	165,2	23,0
7,0	1 500	0,54	1,76	1,2	202,5	23,5

Tabella 18 - Valori del COP in funzione del ΔT_{span} con $\Phi=1.76$ (7,0.54) e $T_H=23^\circ\text{C}$

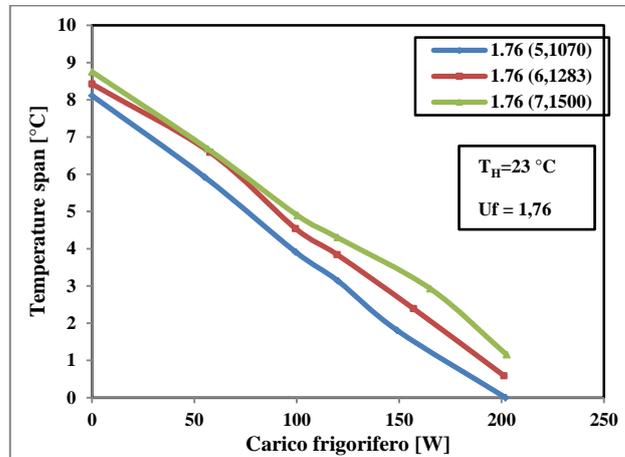


Figura 58 - ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero per tre differenti coppie portata-frequenza ciclo che diano lo stesso Φ uguale a 1.76

La Figura 58, oltre a evidenziare il noto andamento del temperature span rispetto al carico per tutti e tre i casi presi in considerazione, mostra l'effetto che ha l'aumento di portata e il numero di giri a parità di utilization factor; incrementando, infatti, questi due parametri in modo tale che forniscano un ϕ costante, l'andamento del ΔT_{span} trasla verso l'alto. Questo significa che fissando il carico, ad esempio ponendolo pari a 100 W, a parità di ϕ , maggiore è il valore della coppia (V_p , n), maggiore sarà il valore del ΔT_{span} . Il problema sorge nello stabilire se tale variazione sia dovuta alla portata o al regime di rotazione, ma ciò che risulta evidente è la non sufficienza dell'utilisation factor nel caratterizzare il comportamento della macchina.

Un'ulteriore considerazione si può fare osservando altri quattro valori

di Φ : passando dal valore più grande di utilization (2.65) al valore di 0.88, la distanza tra le curve diminuisce, per poi aumentare con Φ ancora più piccolo e pari a 0.53 (Figura 59)

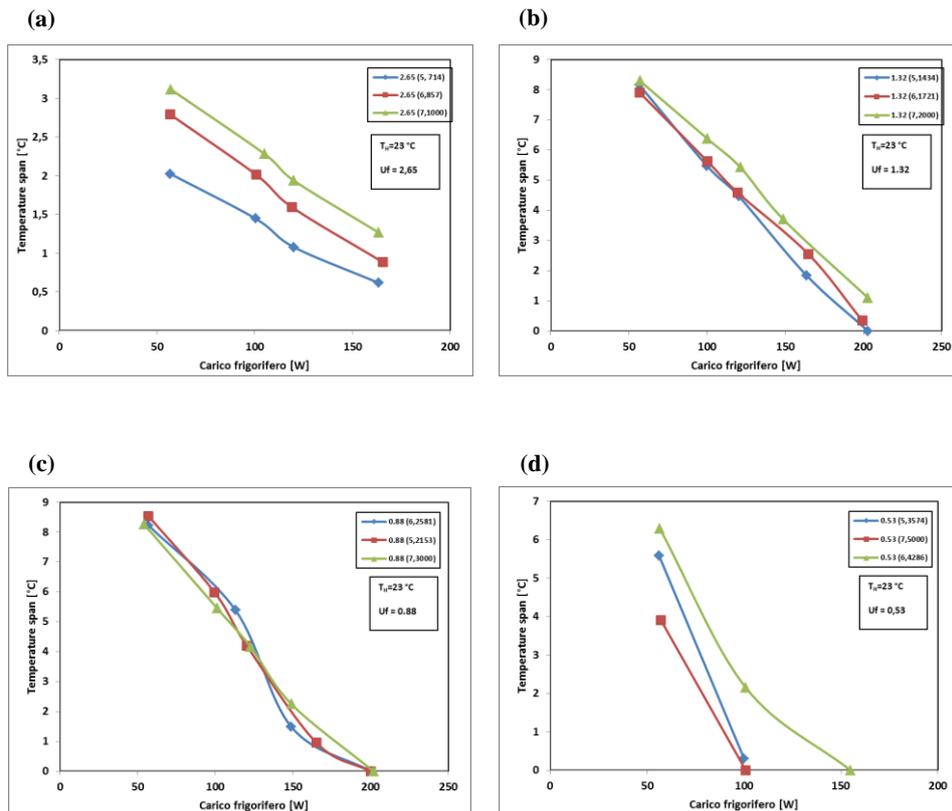


Figura 59 – (a,b,c,d,) ΔT_{span} in funzione del carico frigorifero per tre differenti coppie portata-frequenza ciclo che danno lo stesso Φ (2.65, 1.32, 0.88, 0.53)

3.10 Analisi del COP

L'ultima fase di analisi dei dati sperimentali è relativa allo studio del COP del prototipo oggetto di studio, ottenuto andando a misurare, con dei

watt transducer, le potenze elettriche assorbite dal sistema: boiler elettrico, pompa e motore per la movimentazione dei magneti.

3.10.1. Andamento del COP in funzione del ΔT_{span} con Φ fissato e diverse coppie (V_p, n)

Una prima fase dello studio in oggetto ha riguardato l'analisi dell'andamento del COP rispetto al temperature span per valori di ϕ fissati, ottenuti modificando adeguatamente portata e numero di giri. In particolare, questa analisi ha voluto dimostrare l'inadeguatezza dell'utilization factor nel caratterizzare pienamente le performance di una macchina refrigerativa magnetica.

Prendendo in considerazione un valore di ϕ pari a 1.76, con i diversi valori della coppia (V_p, n) usati per ottenerlo, il COP, come ci si aspettava, assume un andamento monotono decrescente rispetto al temperature span, il quale è stato riscontrato anche per altri utilization (Figura 60). Questa tendenza era facilmente ipotizzabile in quanto le analisi precedenti avevano mostrato che il ΔT_{span} cresce al diminuire del carico frigorifero, che per un sistema frigorifero rappresenta l'effetto utile, dunque maggiore è il temperature span, minore è l'effetto utile ottenibile ed inferiore è il COP.

Dalla Figura 60 si nota, inoltre, come fissato un valore di ΔT_{span} , il COP aumenta al diminuire della portata e della frequenza ciclo, raggiungendo il valore massimo di 2.5 a ΔT_{span} nullo. Questo fenomeno, riscontrato anche per gli altri valori di utilization factor, è facilmente comprensibile in quanto diminuendo la portata si riduce la perdita di carico e quindi la potenza elettrica richiesta dalla pompa; mentre più è bassa la frequenza ciclo minori sono le perdite per attrito e le correnti parassite.

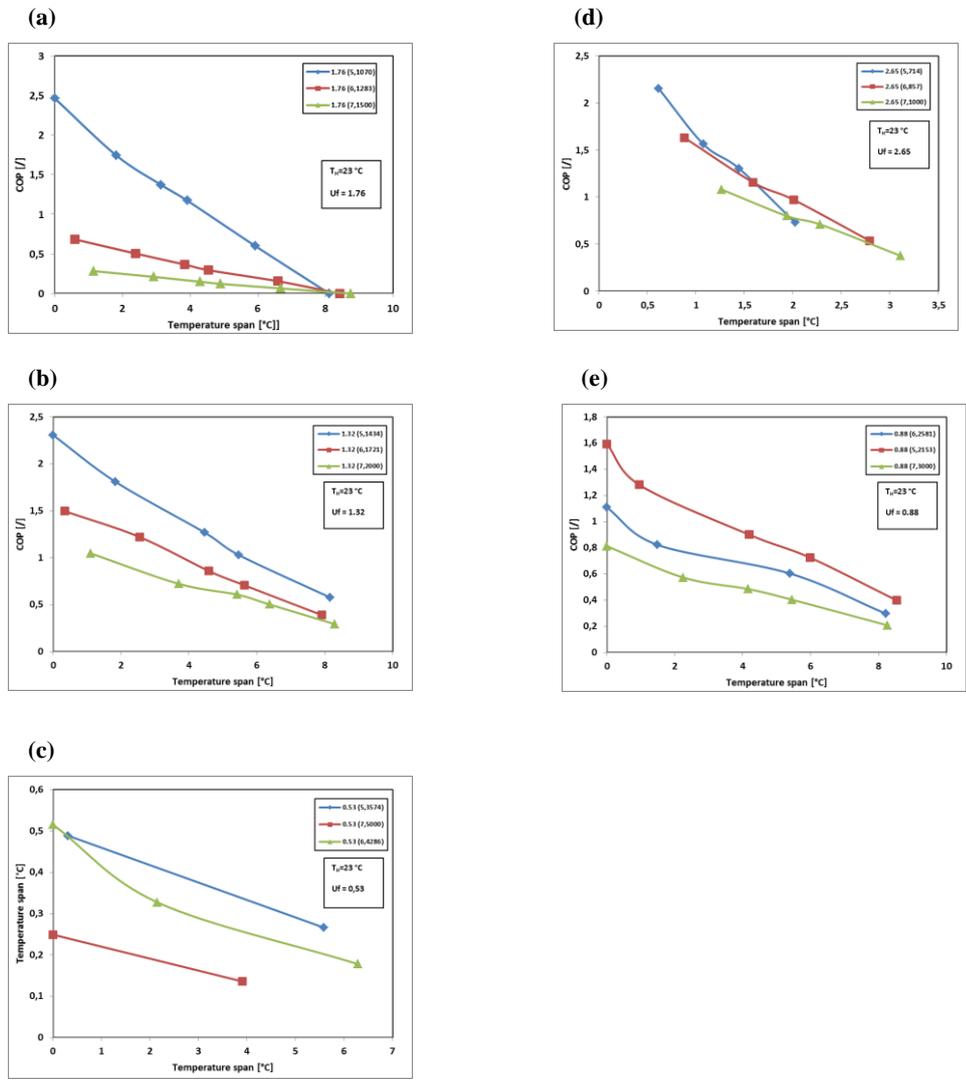


Figura 60 - (a,b,c,d,e) COP in funzione del temperature span per tre diversi utilization factor, ognuno ottenuto con tre diverse coppie di portata e frequenza ciclo

3.10.2. Andamento del COP in funzione di T_H con portata e frequenza ciclo fissata

Un'ulteriore analisi per caratterizzare la relazione intercorrente tra le

diverse variabili in gioco ed il COP è stata effettuata fissando i valori della coppia (V_p, n) al variare della temperatura della sorgente calda. Di seguito si riporta il grafico relativo al caso con $\phi=1.32$, il quale si è ritenuto abbastanza esaustivo dal punto di vista delle considerazioni, in quanto anche con gli altri valori dell'utilization factor si riscontrano le stesse caratteristiche.

V_p [$l\ min^{-1}$]	n [rpm]	f_{AMR}	ϕ	ΔT_{span} [$^{\circ}C$]	Q_{fr} [W]	COP	T_H [$^{\circ}C$]	PVP
7,0	2 000	0,72	1,32	1,2	261,7	1,3	17,4	0,0%
7,0	2 000	0,72	1,33	3,0	200,3	1,0	17,5	0,0%
7,0	2 000	0,72	1,33	4,3	149,9	0,7	17,8	0,0%
6,9	2 000	0,72	1,31	5,2	122,0	0,6	17,8	0,0%
7,0	2 000	0,72	1,32	5,6	101,2	0,5	17,5	0,0%
7,0	2 000	0,72	1,32	6,9	56,9	0,3	17,3	0,0%
7,0	2 000	0,72	1,32	8,5	0,0	0,0	17,4	0,0%

Tabella 19 - Valori del COP in funzione di ΔT_{span} con $\Phi=1.32$ (7,0.72) e $T_H=16^{\circ}C$

V_p [$l\ min^{-1}$]	n [rpm]	f_{AMR}	ϕ	ΔT_{span}	Q_{fr} [W]	COP	T_H [$^{\circ}C$]	PVP
7,1	2 000	0,72	1,34	1,1	203,0	1,0	23,4	100,0%
7,0	2 000	0,72	1,33	3,7	148,8	0,7	22,8	48,6%
7,0	2 000	0,72	1,33	5,4	121,4	0,6	22,8	33,7%
7,0	2 000	0,72	1,33	6,4	100,2	0,5	23,1	32,6%
6,9	2 000	0,72	1,30	8,3	57,1	0,3	23,0	24,7%
7,0	2 000	0,72	1,32	10,0	0,0	0,0	22,7	17,3%

Tabella 20 - Valori del COP in funzione di ΔT_{span} con $\Phi=1.32$ (7,0.72) e $T_H=23^{\circ}C$

V_p [$l\ min^0$]	n [rpm]	f_{AMR}	ϕ	ΔT_{span}	Q_{fr} [W]	COP	T_H [$^{\circ}C$]	PVP
7,1	2 000	0,72	1,34	7,3	0,0	0,0	31,8	100,0%
6,9	2 000	0,72	1,31	3,8	56,3	0,3	31,7	100,0%
7,0	2 000	0,72	1,32	1,1	100,0	0,6	31,8	100,0%
7,0	2 000	0,72	1,33	0,5	120,0	0,7	31,9	100,0%

Tabella 21 - Valori del COP in funzione di ΔT_{span} con $\Phi=1.32$ (7,0.72) e $T_H=32^{\circ}C$

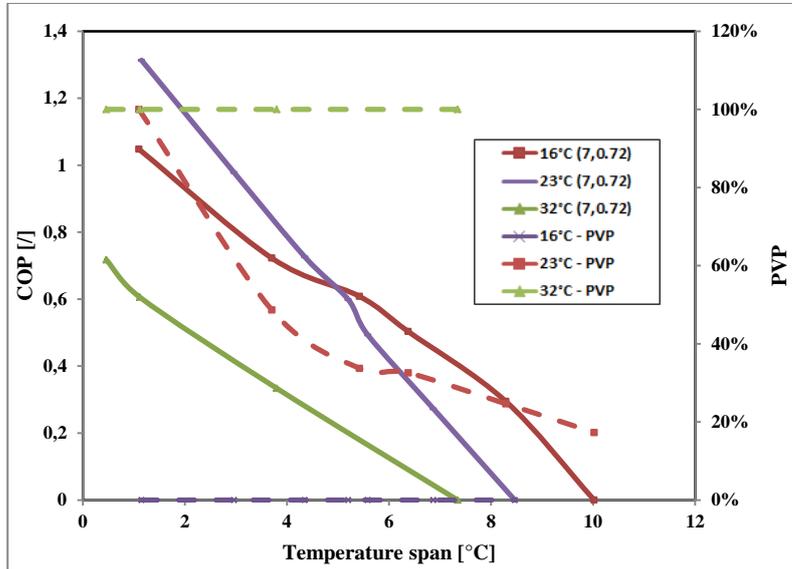


Figura 61 - Andamento del COP in funzione del temperature span con Φ fissato pari a 1.32-(7,0.72) per diversi valori di T_H

La Figura 61 mostra l'andamento monotono decrescente del COP in funzione di T_H nonché, ancora più importante, la variazione della pendenza della curva con temperatura della sorgente calda pari a 23°C.

Tale comportamento si è spiegato ricorrendo al PVP; infatti, come si può notare dalla figura suddetta, mentre per T_H pari a 16°C e 32°C il materiale ha una struttura omogenea, completamente paramagnetico nel primo caso (PVP nullo) e ferromagnetico nel secondo (PVP pari al 100%), con una temperatura della sorgente calda pari a 23°C il materiale ha un PVP variabile. Significativo è, in tal senso, l'intersezione tra la curva con T_H pari a 23°C con quella pari a 32°C per un ΔT_{span} di circa 5°C; da questo punto in poi mentre nel primo caso continuiamo a lavorare nella Mix-zone con buone performance del rigeneratore, nel secondo siamo nella F-zone. In conclusione si può affermare che la pendenza della curva in oggetto è strettamente correlata alla variazione del PVP del materiale.

3.10.3. Analisi del COP in funzione del carico frigorifero

Le considerazioni fin qui effettuate hanno fornito basi solide per dedurre l'andamento del COP rispetto al carico. In tal senso, fissato il valore di Φ , è noto che all'aumentare del temperature span diminuisce sia

il COP che il carico; di conseguenza riducendo il COP si ha una riduzione della potenza frigorifera.

La Figura 62 mostra il COP in funzione del carico frigorifero con Φ (1.76) e T_H (23°C) fissati; quest'ultima mostra chiaramente che il COP ha un andamento monotono crescente rispetto al carico, praticamente lineare, e ciò lo si riscontra anche per tutti gli altri valori dell'utilization factor.

In aggiunta a questa ovvia considerazione, si può notare che la tendenza lineare si conserva anche al variare di portata e numero di giri: l'influenza di queste variabili è legata alla differente pendenza delle rette.

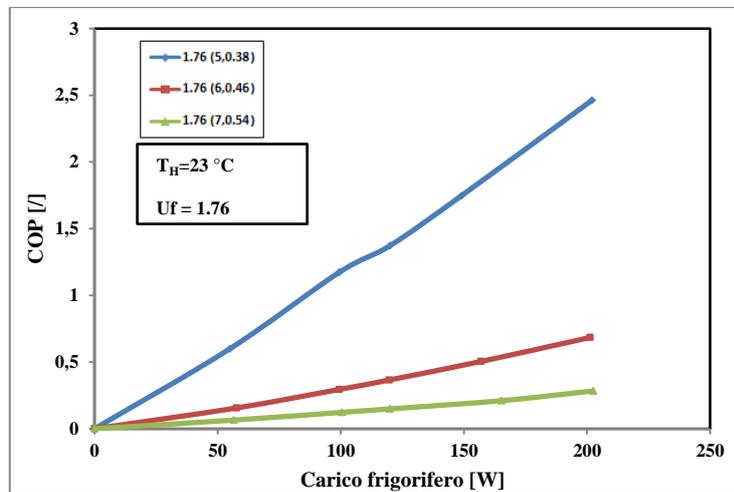


Figura 62 - COP in funzione del carico frigorifero per tre differenti coppie portata-frequenza ciclo corrispondenti allo stesso utilization factor ($\Phi=1.76$)

All'aumentare della coppia (V_p, n), infatti, l'andamento assume una minore pendenza, quindi il valore del COP subisce un minore incremento a parità di crescita del carico. Questo fenomeno è facilmente spiegabile: operare con portata e numero di giri maggiori significa richiedere una maggiore potenza elettrica, quindi, se l'effetto utile rimane invariato, il COP si riduce.

Un'ultima considerazione in merito a tale analisi riguarda, ancora una volta, l'inadeguatezza dell'utilization factor nel caratterizzare le performance di un impianto magnetico refrigerativo, in quanto con lo stesso valore di questa grandezza, ottenuto con diverse coppie di portata e numero di giri, si osservano COP completamente diversi.

CAPITOLO 4: Ottimizzazione del rigeneratore

La campagna prove realizzata nel corso del lavoro di tesi ha reso possibile conoscere i pregi e i limiti dell'architettura scelta per la realizzazione del prototipo di refrigeratore magnetico nonché il completamento della caratterizzazione termodinamica della macchina stessa.

L'incremento delle prestazioni di 8Mag potrebbero essere notevoli utilizzando diversi accorgimenti, come la realizzazione di rigeneratori multi-layer [2][3], l'aumento della quantità di Gadolinio, la sostituzione del supporto in alluminio (magnetocaloric wheel) dei rigeneratori con un altro di materiale plastico e la modifica del circuito idraulico dell'insieme valvola rotante-rigeneratori. Quest'ultimo aspetto ha avuto la massima priorità, infatti l'obiettivo primario che si è prefissi nel lavoro di tesi, a valle della campagna prove, è stato di individuare una soluzione che elimini i volumi morti.

Una prima fase del processo di ottimizzazione di 8Mag, quindi, è stato individuare il disegno di un rigeneratore che sia compatibile con le dimensioni del traferro e del supporto di alluminio e che dia la possibilità di separare le due fasi di passaggio di fluido del ciclo Brayton. Infatti, per come è costruito il prototipo (Figura 39 e Figura 40), durante la fase di scambio termico a campo nullo, il fluido partito dal collettore inferiore giunge all'estremo caldo del rigeneratore, lo attraversa e arriva alla sezione superiore della valvola rotante. Nella fase parallela con campo magnetico imposto, l'acqua svolge lo stesso percorso, attraverso i medesimi tubi, ma nel verso opposto. Pertanto si ha la presenza di una quantità di acqua stagnante nel sistema: i volumi morti.

Successivamente alla definizione del design del nuovo componente, si è fatto ricorso a simulazioni agli elementi finiti finalizzate ad verificare la resistenza meccanica dello stesso nonché ad individuare un materiale che sia in grado di sostituire quello esistente, in particolare il coperchio di acciaio. Infine, si è proceduto a delle simulazioni fluidodinamiche che individuino il reale coinvolgimento del Gadolinio dal passaggio del fluido di lavoro e le perdite di carico che ne conseguono.

4.1 Analisi degli ingombri

La prima fase della realizzazione del nuovo rigeneratore è stata di analizzare i vincoli geometrici del sistema. La base di partenza del nuovo disegno, quindi, sono state le dimensioni esterne del vecchio rigeneratore, ovvero dell'alloggiamento della magnetocaloric wheel e del traferro. Successivamente, grazie all'individuazione in commercio di micro-valvole unidirezionali, è stato prodotto in ambiente SolidWorks un disegno del rigeneratore che abbia per ogni estremo due raccordi in grado di separare con due flussi uni-direzionali le fasi di scambio termico del rigeneratore.

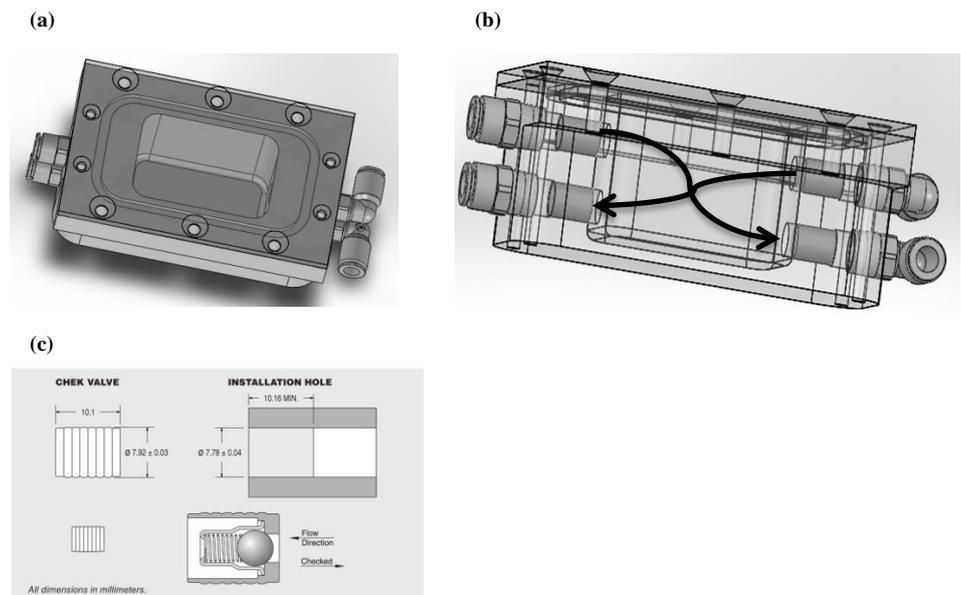


Figura 63 - (a) Disegno CAD del nuovo rigeneratore; (b) particolare dei due flussi unidirezionali di fluido del ciclo Brayton; (c) particolare delle micro-valvole unidirezionali.

La difficoltà maggiore nell'individuare la soluzione di Figura 63 è stata di capire la fattibilità tecnica nell'inserimento, per ogni rigeneratore, di quattro tubi di collegamento tra questi ultimi e la valvola rotante. In tal senso, a valle del disegno del componente, si è proceduto all'analisi degli ingombri del nuovo circuito idraulico.

Utilizzando i disegni 3D in possesso dell'intero prototipo, è stato

simulato il collegamento idraulico di un raccordo istantaneo del rigeneratore con la valvola rotante. In commercio è stato individuato un tubo con le stesse caratteristiche di quello in uso: poliammide di diametro esterno di 6 mm con pressione di esercizio massima di 37 bar a 20°C, ma con raggio di curvatura minore di 20 mm (tubo PA Advanced della Legris). Grazie a queste informazioni si è realizzato il nuovo circuito idraulico verificando che quest'ultimo sia compatibile con i vincoli geometrici imposti dal sistema.

Dalla figura seguente si mostra come sia stato possibile far passare il tubo all'interno dell'angusto passaggio tra il rigeneratore, la ghiera di fissaggio dello statore della valvola rotante alla magnetocaloric wheel e quest'ultima; inoltre da misure effettuate si è verificato, con esito positivo, la possibilità dell'inserimento di entrambi i tubi agli estremi del componente.

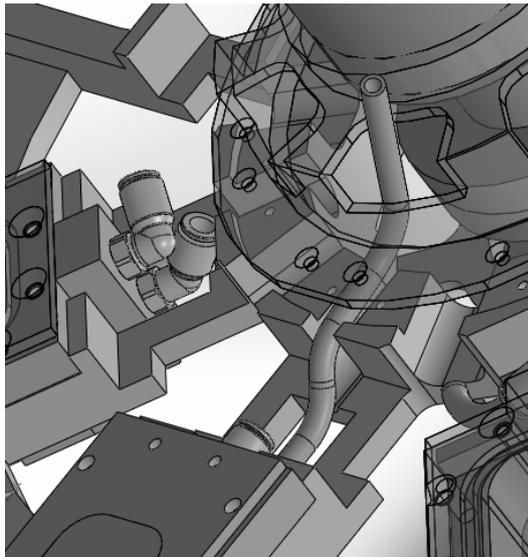


Figura 64 - Analisi degli ingombri del nuovo rigeneratore e del circuito idraulico

La definizione del rigeneratore ha richiesto la riduzione del volume interno al fine di sostituire i diffusori con le micro-valvole, senza compromettere lo spazio a disposizione del Gadolinio. Infatti quest'ultimo resta facilmente accessibile con la possibilità di inserire dei setti per variare la quantità di materiale magnetocalorico contenuta, e quindi l'*utilization factor*. La differenza sostanziale risiede nel minore spessore della base del rigeneratore per l'inserimento, in asse, dei due

innesti rapidi (oltre alle valvole unidirezionali).

La tenuta idraulica continua a essere garantita attraverso l'uso di o-ring frontale, compresso tra il coperchio e la superficie del rigeneratore.

Il materiale impiegato per la realizzazione dei componenti è il risultato di un'analisi strutturale agli elementi finiti che identifica quale tra quelli selezionati sia adatto a resistere al carico meccanico imposto.

Infine la geometria finale del rigeneratore, come mostrata nella figura seguente, è stata studiata tenendo conto della sua realizzazione con macchine ad asportazione di truciolo (presente nel laboratorio di Meccanica dell'Università degli Studi di Salerno).



Figura 65 - Differenza tra il vecchio rigeneratore (a sinistra) e il nuovo ottimizzato (a destra)

4.2 Analisi strutturale

La necessità di variare lo spessore di materiale del nuovo rigeneratore rispetto a quello in uso ha richiesto un'indagine strutturale, con software di simulazione agli elementi finiti, al fine di valutare la resistenza del componente al carico meccanico imposto (pressione interna). Nell'occasione, oltre a valutare il materiale già in possesso, ne sono stati considerati altri presenti in commercio che presentano i seguenti vantaggi: la lavorabilità, la resistenza meccanica, la trasparenza ad effetti magnetici ed elettrici e bassa igroscopicità. Si è cercato, inoltre, di valutare la possibilità di sostituire il coperchio in acciaio con un altro dello stesso materiale della base.

Di seguito i materiali presi in considerazione, oltre quello attualmente

in uso, con le rispettive proprietà meccaniche:

- TECANAT GF 30 o polycarbonato naturale lucido rinforzato con fibre di vetro;
- TECAMID GF30 NERO o poliammide rinforzato con fibre di vetro;
- PA6 o poliammide nero (attualmente in uso)
- ACCIAIO 316L solo per il coperchio (attualmente in uso).

Proprietà	TECANAT GF30	TECAMID GF 30 NERO	PA6	ACCIAIO 316L
Densità [g/cm ³]	1.42	1.34	1.14	8
Moduli di Young [Mpa]	4400	5500	3250	200000
Tensione di snervamento [Mpa]	87	91	78	220

Tabella 22 - Materiali impiegati per la simulazione strutturale del nuovo rigeneratore

Dalla comparazione dei materiali plastici adottati (Tabella 22) si nota come il peso risultante sarebbe minore con l'utilizzo di solo poliammide, crescendo con l'utilizzo delle fibre di vetro fino a un massimo con il polycarbonato rinforzato. La resistenza meccanica e la rigidità maggiori sono garantite da TECAMID GF 30 NERO. La scelta migliore pare essere il poliammide rinforzato con fibre di vetro il quale presenta basso peso ed elevata resistenza, il polycarbonato sarebbe interessante in quanto trasparente mentre il PA6 potrebbe essere la soluzione migliore all'atto pratico in quanto già in possesso di campioni in magazzino.

Le simulazioni effettuate sono state realizzate in due ambienti di sviluppo differenti: Ansys e Comsol al fine di individuare eventuali anomalie dei risultati ottenuti. Non essendoci stata nessuna variazione nei risultati per i diversi tipi di materiale, nel seguito verrà riportata l'analisi in ambiente Comsol.

4.2.1. Analisi del solo coperchio

Una prima fase di studio è stata quella di valutare la possibilità di utilizzare anche per il coperchio un materiale plastico.

Essendo lo studio in oggetto un problema simmetrico sia dal punto di vista del carico applicato che della geometria, al fine di ridurre i tempi di calcolo, è stato simulato il comportamento di un quarto del componente.

Nella figura seguente si mostrano le condizioni al contorno e di carico applicato: incastro nei fori di passaggio delle viti, simmetria sulle facce interne e pressione impostata sulla sezione corrispondente alla presenza di Gadolinio nella base.

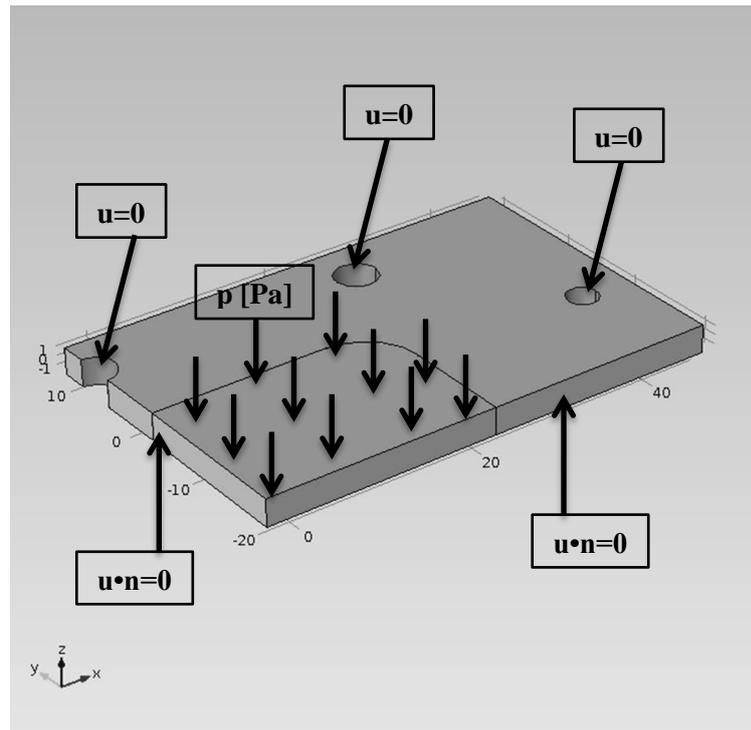


Figura 66 - Condizioni al contorno al problema simmetrico di analisi strutturale del coperchio

Tra i diversi materiali, naturalmente, la scelta dell'acciaio 316L rappresenta una soluzione affidabile sia dal punto di vista della resistenza meccanica che delle deformazioni in gioco. Nella figura seguente si mostra d'altronde che la tensione nel materiale massima sia ben al di sopra quella di snervamento; questo picco è, d'altra parte, da attribuire alla discontinuità geometrica e alla posizione del valore rilevato prossima ai punti di applicazione del carico. Queste ultime, infatti, sono le cause che portano a errori di tipo numerico da cui derivano le sovrasollecitazioni da *non* prendere in considerazione.

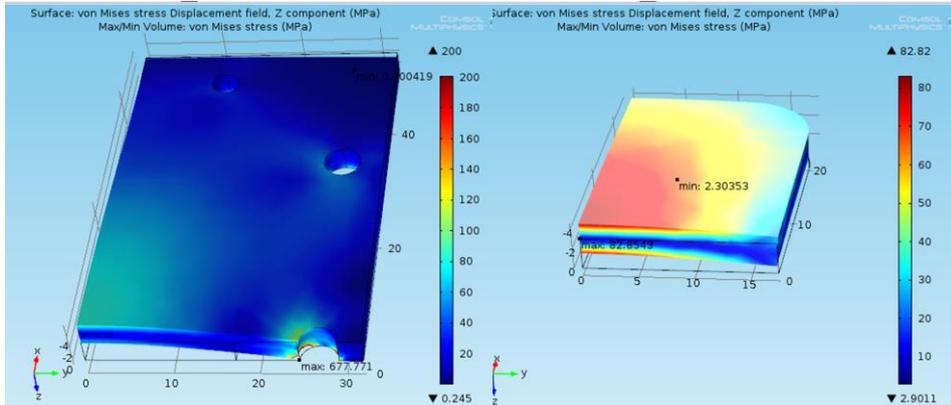


Figura 67 – Acciaio 316L: Analisi della tensione dell'interno coperchio (a destra) e del solo dominio di applicazione del carico (a sinistra) per una pressione impostata di 10 bar.

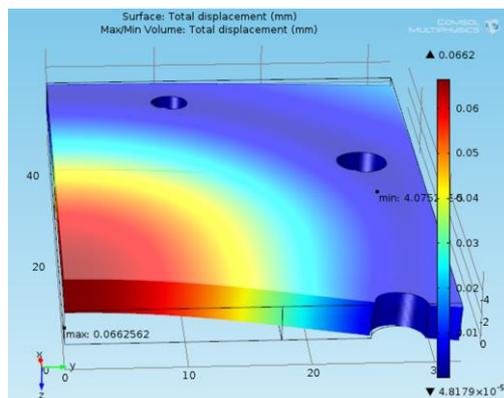


Figura 68 – Acciaio 316L: Analisi della deformazione dell'interno coperchio con una pressione applicata di 10 bar.

In tal senso nella Figura 67 e Figura 68 si mostra come nella sezione di applicazione del carico sia gli sforzi che le deformazioni massime calcolate, per una pressione di 10bar, siano piccole: 82Mpa e circa 0.007 mm.

Nelle figure seguenti si mostra il risultato dell'analisi effettuata per gli altri materiali presi in considerazioni, da cui si evince che, per le alte pressioni in gioco (anche 10bar), si ha una deformazione eccessiva del materiale. Quest'ultima, anche se non provoca la rottura del materiale, creerebbe importanti trafile di acqua, rendendo così il rigeneratore

inutilizzabile. Pertanto la migliore soluzione è rappresentata dall'utilizzo del coperchio in acciaio.

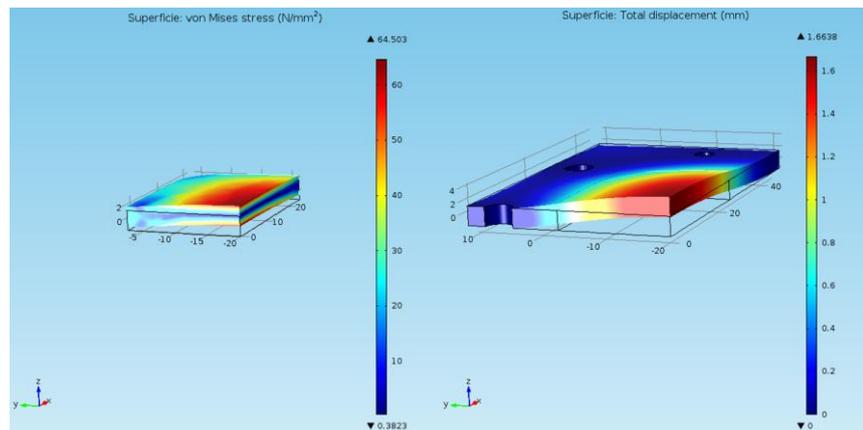


Figura 69 – Tecanat GF30 : Analisi della tensione del solo dominio di applicazione del carico (a sinistra) e della deformazione (a destra) per una pressione impostata di 10 bar.

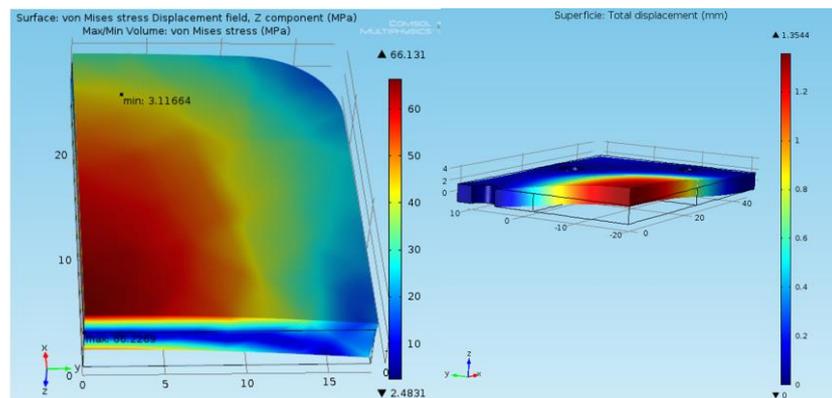


Figura 70 - Tecamid GF30 : Analisi della tensione del solo dominio di applicazione del carico (a sinistra) e della deformazione (a destra) per una pressione impostata di 10 bar.

4.2.2. Analisi della base

Riguardo alla base, invece, anche se il nuovo rigeneratore ha spessori inferiori a quello in uso, non presente in nessun caso né problemi di eccessiva deformazione né di cedimenti strutturali. Come anticipato, essendo in possesso di campioni di barre in poliammide, si è optato per la realizzazione del nuovo rigeneratore con gli stessi materiale del precedente.

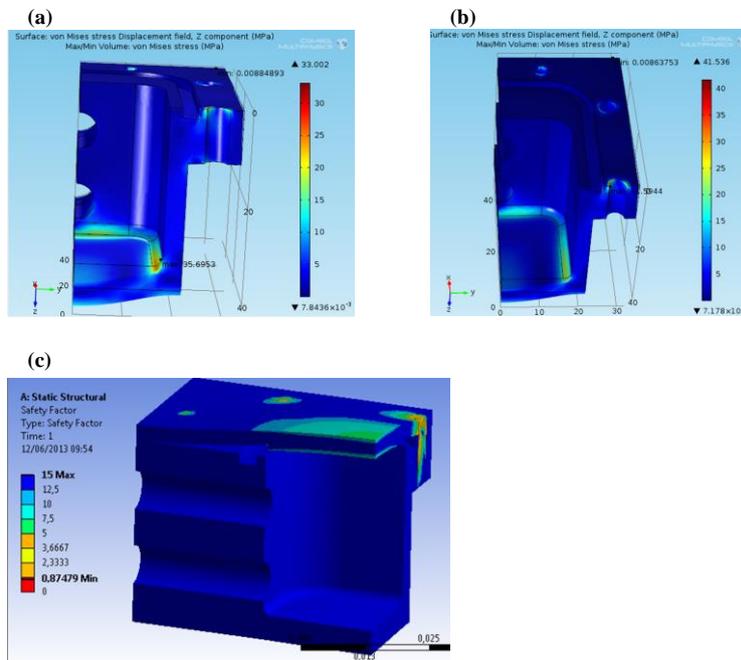


Figura 71 - (a) Sollecitazioni della base del rigeneratore in: (a) Tecanat GF 30, (b) Tecamid GF 30, (c) PA6 (Ansys 14.0)

Nella figura seguente si mostra il rigeneratore definitivo in cui il coperchio, così come la base del componente, sono stati realizzati presso l'Università degli Studi di Salerno con macchine a controllo numerico.

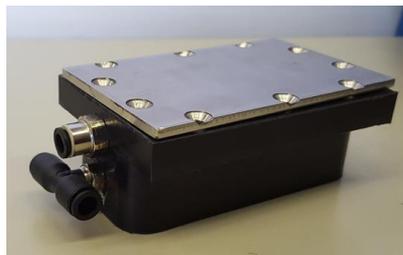


Figura 72 - Ottimizzazione del rigeneratore: modello definitivo

L'ultima fase del processo di ottimizzazione del rigeneratore è stata la messa in pressione per testarne la resistenza e la tenuta idraulica. In particolare il rigeneratore è stato testato con acqua in pressione fino al raggiungimento di un massimo di 15 bar per lunghi periodi senza perdite apprezzabili.

4.3 Analisi fluidodinamica

La definizione geometrica del nuovo rigeneratore ha portato a una rivalutazione dell'architettura interna: sono state inserite delle valvole unidirezionali, sono stati eliminati i diffusori ed è stato modificato il percorso del fluido all'interno del solido, mentre le dimensioni esterne sono rimaste inalterate. Così come una variazione negli spessori ha richiesto la verifica strutturale del componente, la nuova configurazione idraulica ha indotto a una valutazione delle prestazioni fluidodinamiche del rigeneratore; pertanto è stato indagato, tramite simulazioni agli elementi finiti in ambiente Ansys CFX, il reale coinvolgimento del solido al passaggio del fluido e le perdite di carico che la nuova configurazione ha comportato.

4.3.1. Mezzi porosi

Il rigeneratore, così come ampiamente descritto nei paragrafi precedenti, è composto da un pacco di sfere di Gadolinio di piccolo diametro. La struttura del solido così creata appartiene a un complesso insieme di solidi definiti "mezzi porosi". Questi ultimi sono materiali molto comuni, basti pensare alla sabbia, ai tessuti biologici come le ossa e la pelle, le ceramiche etc., le cui equazioni termo-fluidodinamiche sono complesse oltre a richiedere grandi risorse computazionali.

Nonostante le varietà di forme e caratteristiche che i mezzi porosi presentano, il concetto comune che sta alla base della teoria di tali sostanze rimane quello della porosità. Essa è definita come il rapporto della frazione vuota nel materiale poroso rispetto al volume totale occupato dal mezzo poroso.

Un'altra grandezza caratteristica dei mezzi porosi è la permeabilità, definita come l'attitudine di un mezzo a lasciarsi attraversare da un fluido: essa è una caratteristica del mezzo poroso indipendente dal fluido impiegato. La permeabilità si esprime in Darcy (d), dove nel Sistema internazionale 1d equivale a $0,987 \cdot 10^{-12} \text{m}^2$.

Lo studio che si è svolto sul rigeneratore è puramente fluidodinamico, semplificando così l'onere computazionale. Inoltre i modelli matematici utilizzati per descrivere il comportamento del MCM come mezzo poroso saturato da fluidi sono stati il modello di Darcy e di Forchheimer.

Il primo descrive il moto di un fluido in un mezzo poroso saturo nel caso in cui non esistano interazioni “chimico-fisiche” fra fase solida e fase liquida ed il moto sia laminare; pertanto l’equazione, nota come *legge di Darcy*, afferma che la velocità di un fluido attraverso un mezzo poroso è proporzionale al gradiente di pressione nella direzione del flusso, ovvero nel caso mono-dimensionale sia ha che:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k} v \quad 77$$

dove v è la velocità del fluido nella direzione x , p è la pressione del fluido nel mezzo poroso, μ è la viscosità del fluido e k è la permeabilità del mezzo poroso.

Ci sono casi, come quello oggetto di studio, in cui il moto non si sviluppa in regime laminare.

Dal punto di vista tecnico questo effetto, che è chiamato non-Darcy, è molto importante perché può portare a una errata valutazione del flusso.

Nel 1901 Forchheimer si rese conto che il gradiente di pressione richiesto per mantenere una certa portata attraverso un mezzo poroso fosse più alto di quello previsto dalla legge di Darcy.

Egli aggiunse un secondo termine, detto non-Darcy, per colmare la discrepanza esistente fra i valori sperimentali e quelli previsti dalla legge di Darcy.

L’equazione sperimentale, nota come equazione di Forchheimer, che rappresenta il legame fra gradiente di pressione e velocità apparente in presenza degli effetti non-Darcy è la seguente:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{k} v + \beta \rho v^2 \quad 78$$

in cui β è il coefficiente di flusso non-Darcy, un parametro che caratterizza il fenomeno e che dipende dal mezzo poroso.

Nell’equazione di Forchheimer l’aumento di perdita di carico è ottenuto aggiungendo al termine lineare un termine quadratico della velocità moltiplicato per la densità del fluido e per il coefficiente di flusso non-Darcy β .

In letteratura esistono diverse correlazioni tra la perdita di carico, la velocità e le caratteristiche del mezzo poroso. Il gruppo di ricerca del Laboratorio di Tecnica del freddo ha recentemente [8] utilizzato l’equazione di Ergun per identificare le caratteristiche idrauliche del rigeneratore in uso attualmente dal prototipo oggetto di studio:

$$\Delta p = L_{PB} \left(\frac{150\mu (1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} V_0 + \frac{1.75\rho_f (1-\varepsilon)}{d^2 \varepsilon^3} V_0^2 \right) \quad 79$$

Confrontato le due equazioni: Forchheimer ed Ergun, si può, quindi, definire sia la permeabilità che il fattore non-Darcy del pacco di sfere di Gadolinio:

$$\frac{1}{k} = \frac{150 (1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} \quad 80$$

;

$$\beta = \frac{1.75 (1-\varepsilon)}{d^2 \varepsilon^3} \quad 81$$

4.3.2. Risultati della simulazione

L'ottimizzazione del nuovo rigeneratore prevede, come anticipato nei paragrafi precedenti, una variazione delle dimensioni interne dello stesso; ma, a restare invariato, è il materiale magnetocalorico e le sue proprietà. In tal senso è stata effettuata un'indagine sperimentale che identifichi le perdite di carico del pacco di sfere di Gadolinio in funzione della portata. L'obiettivo è stato di determinare sperimentalmente la permeabilità del solido e il coefficiente di flusso non-Darcy.

Per determinare le grandezze suddette possiamo ricorrere direttamente all'equazione di Forchheimer in forma differenziale.

La validità della forma binomiale di Forchheimer può essere controllata esprimendo $(dp/dx)/\mu v$ in funzione del rapporto $\rho v/\mu$.

Questo grafico deve dare una linea retta. L'intercetta di questa retta con l'asse delle ordinate $(dp/dx)/\mu v$ determina il valore del reciproco della permeabilità, mentre β è dato dall'inclinazione rispetto all'asse $\rho v/\mu$.

Dal momento che abbiamo a che fare con mezzi porosi che hanno dimensioni finite, occorre procedere all'integrazione della equazione di Forchheimer, ed essendo il fluido rigenerante un liquido (acqua), non comporta particolari difficoltà:

$$\frac{(p_{hot}-p_{cold})}{L_{PB}\mu v} = \frac{1}{k} + \frac{\beta\rho v}{\mu} \quad 82$$

Come si evince dalla figura seguente, le due rette: dati sperimentali e retta di regressione coincidono, le cui incognite sono risultate pari a :

$$k=7.618e-11 \text{ m}^2;$$

$$\beta=2.6e5 \text{ m}^{-1}$$

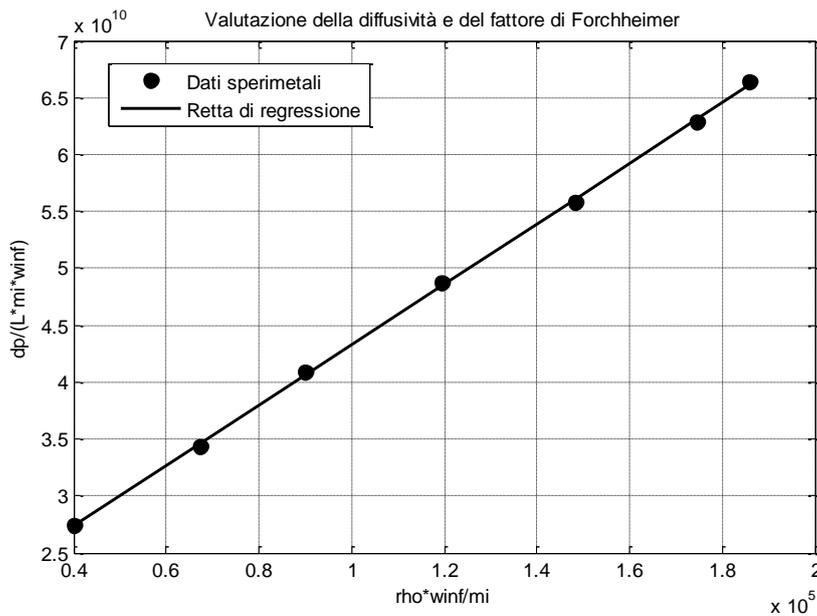
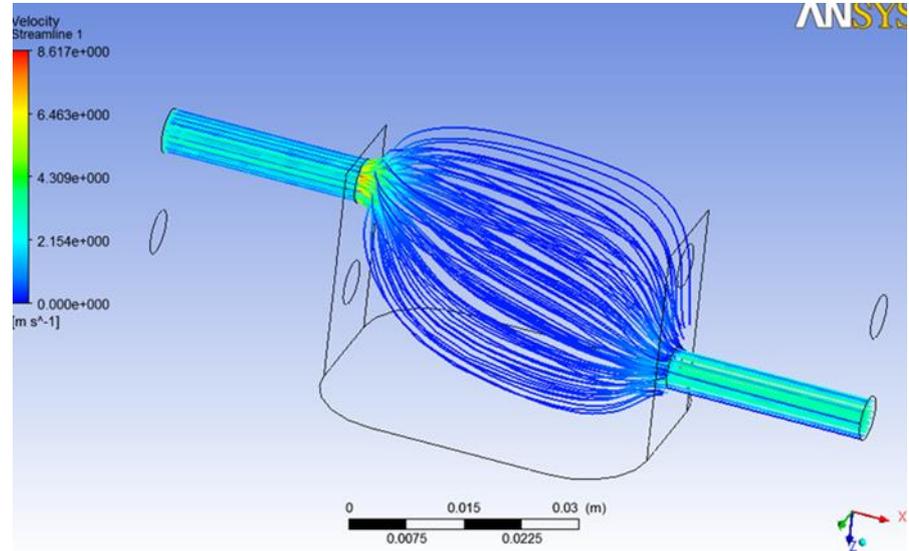


Figura 73 - Rilievo sperimentale delle caratteristiche del MCM inteso come mezzo poroso

In ambiente Ansys CFX è stato, successivamente, importato il disegno CAD del nuovo rigeneratore in cui, definite le proprietà del mezzo poroso, è stato possibile realizzare delle simulazioni fluidodinamiche del nuovo rigeneratore. I test sono stati eseguiti con portata impostata di 3.5 l min^{-1} ; questo valore rappresenta la portata massima raggiungibile dal singolo rigeneratore in base all'architettura attuale del prototipo oggetto di studio.



Il risultato di tale analisi ha evidenziato come le perdite di carico siano pari a 1.1 bar, in linea con il vecchio rigeneratore, e come, nonostante un percorso di fluido differente dalla precedente configurazione, si ha un ampio volume di solido interessato dal passaggio del fluido rigenerante.

Conclusioni

I sistemi di refrigerazione a temperatura ambiente hanno avuto negli ultimi decenni un notevole sviluppo; ciò è dovuto alla crescente domanda da parte del mercato di climatizzare gli ambienti di lavoro e residenziali oltre la crescente necessità di conservare gli alimenti. Infatti, i sistemi di refrigerazione rappresentano oggi circa il 20-30% dei consumi in ambiente domestico. La principale tecnologia di refrigerazione a temperatura ambiente è rappresentata dalla compressione di vapore, tecnologia matura e consolidata che utilizza dei gas fluorurati o idrocarburi come refrigeranti e rumorosi compressori come fonte del moto.

Una possibile alternativa alla su citata compressione di vapore è la refrigerazione magnetica, un innovativo sistema di refrigerazione che utilizza un solido come refrigerante e un fluido (acqua) come rigenerante. I vantaggi attesi sono molteplici: elevata efficienza, nessun impatto diretto sul riscaldamento globale, utilizzo di sostanze non dannose né per l'uomo né per l'ambiente, minimo rumore delle fonti di moto.

La possibilità di individuare una valida alternativa alla compressione di vapore ha portato a un numero sempre crescente di centri di ricerca a studiare tale tecnologia.

Il Laboratorio di Tecnica del Freddo dell'Università degli Studi di Salerno è stato uno dei primi centri di ricerca a studiare e a realizzare un prototipo di refrigeratore magnetico operante a temperatura ambiente: il primo funzionante in Italia.

Lo scopo principale del presente lavoro di tesi è stato il completamento del prototipo suddetto e la realizzazione di una esaustiva campagna prove volta alla conoscenza del funzionamento di una tecnologia così innovativa nonché all'individuazione delle possibili strade per incrementarne le prestazioni.

Nel testo è stato introdotto un *background teorico* riguardo alla refrigerazione magnetica effettuando un'estensione delle nozioni della termodinamica dei sistemi semplici rispetto a quella dei sistemi complessi. Sono state introdotte quindi le nozioni relativamente all'effetto magnetocalorico e al principio di funzionamento di un refrigeratore magnetico del tipo AMR. Successivamente si è potuto procedere alla descrizione dell'architettura del prototipo di refrigeratore magnetico oggetto di studio (denominato *8Mag*) e dei componenti che lo

costituiscono e, quindi, a una descrizione del funzionamento dello stesso.

Sono state descritte, in seguito, le grandezze fondamentali che vengono utilizzate in letteratura per valutare le performance dei diversi prototipi di refrigeratore magnetico esistenti nonché le modalità operative con cui sono state misurate sul prototipo oggetto di studio. In particolare sono stati descritti i sensori adoperati e il software di acquisizione e controllo realizzato ad hoc. Quest'ultimo capace di acquisire i dati dai trasduttori e controllare le fonti di moto del sistema.

E' stata ricavata, con una campagna prove sperimentale di 468 test su 33 variabili, la caratterizzazione termo-fluidodinamica completa della macchina in funzionamento stazionario.

E' stato ricavato il valore dell'utilization factor, ovvero la relazione che permette di valutare la quantità di fluido che attraversa il rigeneratore in funzione della frequenza ciclo e della portata di fluido della pompa.

Con test a carico frigorifero nullo è stata indagata la variazione della coppia in funzione della frequenza ciclo e della temperatura della sorgente calda. La prima è stata imputata principalmente all'aumento delle correnti parassite indotte sulle parti in alluminio e proporzionali alla frequenza ciclo, mentre la seconda alle proprietà termofisica del materiale: la temperatura di Curie. Dall'indagine di quest'ultimo aspetto è stato introdotto il concetto di percentuale di volume paramagnetico (PVP) per il rigeneratore, il quale influisce sulla pendenza dei profili di temperature span in funzione del carico frigorifero o del COP in funzione del ΔT_{span} .

Inoltre è stato evidenziato come il funzionamento del rigeneratore venga ottimizzato allorquando si ha una percentuale di volume paramagnetico compresa tra il 30% e il 60%, ovvero la temperatura di Curie è localizzabile nell'intervallo 30-60% della posizione assiale del flusso all'interno del componente.

Dal confronto di test sperimentali con la temperatura della sorgente calda fissata, è stato evidenziato l'effetto dei volumi morti sul funzionamento del prototipo oggetto di studio. In particolare l'effetto di questa quantità di acqua è stato duplice: massime prestazioni termodinamiche con un utilization factor circa il doppio di quello nominale e campi di temperatura durante lo scambio termico fluido-solido non di progetto.

E' stato indagato anche l'effetto della frequenza e dell'utilization factor sulle performance del prototipo oggetto di studio, in particolare è stato mostrato come il temperature span sia piccolo a basse frequenze di

lavoro e quindi ad alti utilization, per poi raggiungere un valore massimo e diminuire, successivamente, raggiunto quest'ultimo: fase in cui i fattori di perdita (come l'attrito della valvola rotante, la maldistribuzione del fluido durante la rotazione di quest'ultima) e i volumi morti diventano significanti.

L'ultima fase di analisi dei dati sperimentali è stata lo studio del COP del prototipo oggetto di studio, ottenuto andando a misurare, con dei watt transducer, le potenze elettriche assorbite dal sistema: boiler elettrico, pompa e motore (per la movimentazione dei magneti). Un primo risultato è stato ottenuto andando a valutare l'andamento del COP rispetto al temperature span per diversi valori dell'utilization factor. In particolare si è dimostrato come quest'ultima grandezza sia inadeguata nel caratterizzare pienamente le performance di una macchina refrigerativa magnetica.

Dai risultati ottenuti è stato importante osservare, inoltre, come, nonostante siano emersi dei limiti nell'architettura in uso, il COP abbia raggiunto valori accettabili per la refrigerazione a temperatura ambiente, ovvero un valore di 2.5 con ΔT_{span} nullo.

Infine, il lavoro di tesi si è concluso con la definizione, attraverso un'analisi geometrica, strutturale e fluidodinamica, di un nuovo rigeneratore con lo scopo di eliminare i volumi morti.

Sviluppi futuri del presente lavoro prevedono un'indagine sperimentale delle performance di *8Mag* con i nuovi rigeneratori; l'implementazione delle diverse soluzioni individuate per superare i limiti dell'attuale architettura e lo sviluppo di un sistema di controllo, per esempio con delle reti neurali, *stand-alone* del prototipo.

Ringraziamenti

Uno speciale ringraziamento lo devo al Prof. Ciro Aprea per avermi guidato nel percorso di crescita accademico e professionale, per avermi insegnato ad affrontare i problemi e per le molteplici opportunità che mi ha offerto. Un grazie per aver creduto nelle mie capacità.

Vorrei ringraziare anche il Prof. Angelo Maiorino per i suoi numerosi consigli accademici e professionali, ma soprattutto per la pazienza nella revisione dei miei lavori e per la sua amicizia.

Un ringraziamento alla Graded S.p.A., in particolare l'Ing. Vito Grassi per la fiducia che ha riposto in me, a Gennaro Longobardi, persona dalle molteplici qualità, a cui devo la mia formazione sia gestionale che operativa nell'ambito della manutenzione degli impianti tecnologici.

Vorrei esprimere la mia enorme gratitudine alla mia famiglia: a mio padre presente in ogni occasione, a mia madre per avermi sopportato e per il suo affetto, a mia sorella per essermi sempre accanto.

Un ringraziamento particolare va a mia moglie, Arianna, che ha dovuto sopportarmi per un lungo periodo accademico, dalla laurea triennale ad oggi, e per i numerosi giorni del suo tempo libero trascorsi a casa per supportarmi nello studio. Grazie per la pazienza e l'amore.

Vorrei ringraziare Maurizio, Fabrizio, Alessandro, Andrea, Pietro e tutte le persone per la loro amicizia e per i bei momenti trascorsi insieme.

Un particolare ringraziamento a Giulio Mauro, per la sua amicizia e per avermi aiutato in numerose occasioni.

Bibliografia

- [1] **Aprea, C., Maiorino, A., 2010.** *A flexible numerical model to study an active magnetic refrigerator for near room temperature applications.* Appl. Energy 87 (8), 2690–2698.
- [2] **Aprea, C., Greco, A., Maiorino, A., 2011a.** *A numerical analysis of an Active magnetic regenerative cascade system.* Int. J. Energy Res. 35, 177–188.
- [3] **Aprea, C., Greco, A., Maiorino, A., 2011b.** *A numerical analysis of an active magnetic regenerative refrigerant system with a multi-layer regenerator.* Energy Convers. Manag. 52, 97–107.
- [4] **Aprea, C., Greco, A., Maiorino, A., 2012.** *Modelling an active magnetic refrigeration system: a comparison with different models of incompressible flow through a packed bed.* Appl. Therm. Eng. 36, 296–306.
- [5] **Aprea, C., Greco, A., Maiorino, A., 2013a.** *The use of the first and of the second order phase magnetic transition alloys for an AMR refrigerator at room temperature: a numerical analysis of the energy performances.* Energy Convers. Manag. 70, 40–55.
- [6] **Aprea, C., Greco, A., Maiorino, A., 2013b.** *A dimensionless numerical analysis for the optimization of an AMR cycle.* Int. J. Energy Res. 37 (12), 1475–1487.
- [7] **Aprea, C., Greco, A., Maiorino, A., 2014a.** *Magnetic refrigeration: a promising new technology for energy saving.* Int. J. Amb. Energy doi:10.1080/01430750.2014.962088.
- [8] **Aprea, C., Greco, A., Maiorino, A., Mastrullo, R., Tura, A., 2014b.** *Initial experimental results from a rotary permanent magnet magnetic refrigerator.* Int. J. Refrigeration 43, 111–122. doi:10.1016/j.ijrefrig.2014.03.014.
- [9] **Aprea, C., Cardillo, G., Greco, A., Maiorino, A., Masselli, C., 2015a.** *A comparison between experimental and 2D numerical results of a packed-bed active magnetic regenerator.* Appl. Therm. Eng. 90, 376–383. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.07.020.
- [10] **Aprea, C., Greco, A., Maiorino, A., Masselli, C., 2015b.** *A*

- comparison between rare earth and transition metals working as magnetic materials in an amr refrigerator in the room temperature range.* Appl. Therm. Eng. 91, 767–777. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.08.083.
- [11] **Arnold, D.S., Tura, A., Rowe, A.,** 2011. *Experimental analysis of two-material active magnetic regenerator.* Int. J. Refrigeration 34, 178–191.
- [12] **Barclay, J.A.** *The theory of an active magnetic regenerative refrigerator.* 1982, NASA STI/Recon Technical Report N 83,34087
- [13] **Bahl, C.R.H., Engelbrecht, K.L., Bjørk, R., Eriksen, D., Smith, A., Nielsen, K.K., et al.,** 2011. *Design concepts for a continuously rotating active magnetic regenerator.* Int. J. Refrigeration 34, 1792–1796.
- [14] **Bahl, C.R.H., Engelbrecht, K., Eriksen, D., Lozano, J.A., Bjørk, R., Geyti, J., et al.,** 2014. *Development and experimental result from a 1 kW prototype AMR.* Int. J. Refrigeration 37, 78–83.
- [15] **Balli, M., Sari, O., Mahmed, C., Besson, C., Bonhote, P., Duc, D., et al.,** 2012. *A pre-industrial magnetic cooling system for room temperature application.* Appl. Energy 98, 556–561.
- [16] **Bingfeng, Y., Zhang, Y., Qiang, G., Dexi, Y.,** Research on performance of regenerative room temperature magnetic refrigeration cycle. Int. J. Refrigeration 2006, 29(8), 1348-1357
- [17] **Bjørk, R., Bahl, C.R.H., Smith, A., Pryds, N.,** 2010. Review and comparison of magnet designs for magnetic refrigeration. Int. J. Refrigeration 33 (3), 437-448.
- [18] **Burdyny, T., Rowe, A.,** 2013. *Simplified modeling of active magnetic regenerators.* Int. J. Refrigeration 36, 932–940.
- [19] **Dikeos, J., Rowe, A.,** 2013. *Validation of an active magnetic regenerator test apparatus model.* Int. J. Refrigeration 36, 921–931.
- [20] **Gomez, J. Romero, et al., et al.** *Magnetocaloric effect: A review of the thermodynamic cycles in magnetic refrigeration.* Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013, 74-82.
- [21] **Engelbrecht, K.L., Bahl, C.R.H., Nielsen, K.K.,** 2011. *Experimental results for a magnetic refrigerator using three*

- different types of magnetocaloric material regenerators.* Int. J. Refrigeration 34, 1132–1140.
- [22] **Engelbrecht, K.L., Eriksen, D., Bahl, C.R.H., Bjørk, R., Geyti, J., Lozano, J.A., et al.,** 2012. *Experimental results for a novel rotary active magnetic regenerator.* Int. J. Refrigeration 35, 1498–1505.
- [23] **Gao, Q., Yu, B.F., Wang, C.F., Zhang, B., Yang, D.X., Zhang, Y.,** 2006. *Experimental investigation on refrigeration performance of a reciprocating active regenerator of room temperature magnetic refrigeration.* Int. J. Refrigeration 29, 622–636.
- [24] **He, J., Wu, X., Deng, X.F.** *Performance characteristics of an irreversible magnetic Brayton refrigeration cycle.* Int. J. Refrigeration 2008, 31 (1), 138-144
- [25] **Hirano, N., Nagaya, S., Takahashi, M., Kuriyama, T., Ito, K., Nomura, S.,** 2002. *Development of magnetic refrigerator for room temperature application.* Adv. Cryog. Eng. 47, 1027–1034.
- [26] **Hirano, N., Nagaya, S., Okamura, T., Kawanami, T., Wada, H.,** 2007. *Development of room temperature magnetic refrigerator-overall plan.* 2nd International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoz, Slovenia.
- [27] **Kitanovski, A., Egolf, P.W.** *Thermodynamics of magnetic refrigeration.* Int. J. Refrigeration 2006, 29 (1), 3-21
- [28] **Lozano, J.A., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H., Nielsen, K.K., Eriksen, D., Olsen, U.L., et al.** *Performance analysis of a rotary active magnetic refrigerator.* Appl. Energy 2013, 111, 669–680.
- [29] **Lozano, J.A., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H., Nielsen, K.K., Barbosa, J.R., Jr., Smith, A., et al.,** 2014. *Experimental and numerical results of high frequency rotating active magnetic refrigerator.* Int. J. Refrigeration 37, 92–98.
- [30] **Moreno-Ramírez, L.M., Ipus, J.J., Franco, V., Blázquez, J.S., Conde, A.** *Analysis of magnetocaloric effect of ball milled amorphous alloys: Demagnetizing factor and Curie temperature distribution.* International Journal of Thermal Sciences 2015
- [31] **Maiorino, A.** *La refrigerazione magnetica a temperatura ambiente: modellazione matematica di un sistema innovativo del tipo a magneti permanenti.* . s.l. : Tesi di dottorato, 2008.

- [32] **Moffat, R.J.**, 1985. Using uncertainty analysis in the planning of an experiment. *Trans. ASME J. Fluid. Eng.* 107, 173-178.
- [33] **Okamura, T., Yamada, K., Hirano, N., Nagaya, S.**, 2006. *Performance of a room-temperature rotary magnetic.* *Int. J. Refrigeration* 29, 1327–1331.
- [34] **Okamura, T., Rachi, R., Hirano, N., Nagaya, S., Kawanami, T.**, 2007. *Improvement of 100W class room temperature magnetic refrigerator*, 2nd International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoz, Slovenia.
- [35] **Pecharskya, A.O., Gschneidner Jr K.A., Pecharsky. V.K.** *The giant magnetocaloric effect between 190 and 300 K in the Gd₅Si_xGe_{4-x} alloys for 1<x<2.2.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 1999, 44-56.
- [36] **Rowe, A., Tura, A.**, 2006. *Experimental investigation of a three-material layered active magnetic regenerator.* *Int. J. Refrigeration* 29 (8), 1286–1293.
- [37] **Russek, S., Auringer, J., Boeder, A., Chell, J., Jacobs, S., Zimm, C.**, 2010. *The performance of a rotary refrigerator with layered beds.* *Proceedings of the 4th International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*, Baotou, Inner Mongolia, China, 339–349.
- [38] **Sari, O., Balli, M.** *From conventional to magnetic refrigerator technology.* *Int. J. Refrigeration* 2014, 37, 8-15
- [39] **Tishin, A.M., Spichkin, Y.I.** *The magnetocaloric effect and its applications.* *Series in Condensed Matter Physics* 2003, IOP publishing, Bristol, Philadelphia
- [40] **Tagliafico, L.A., Scarpa, F., Valsuani, F., Tagliafico, G.**, 2013. *Preliminary experimental results from a linear reciprocating magnetic refrigerator prototype.* *App. Th. Eng.* 52 (2), 492-497.
- [41] **Trevizoli, V.P., Barbosa Jr., J.R., Oliveira, P.A., Canesin, F.C., Ferreira, R.T.S.**, 2012. *Assessment of demagnetization phenomena in the performance of an active magnetic regenerator.* *Int. J. Refrigeration* 35 (4), 1043-1054.
- [42] **Tura, A., Rowe, A.**, 2009. *Progress in the characterization and optimization of a permanent magnet magnetic refrigerator.* In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Magnetic*

- Refrigeration at Room Temperature, Des Moines, Iowa, USA, pp. 387-392.
- [43] **Tura, A., Rowe, A., 2011.** Permanent magnet magnetic refrigerator design and experimental characterization. *Int. J. Refrigeration* 34 (3), 628-639.
- [44] **Tušek, J., Kitanovski, A., Zupan, S., Prebil, I., Poredoš, A., 2013.** *A comprehensive experimental analysis of gadolinium active magnetic regenerators.* *Appl. Therm. Eng.* 53 (1), 57–66.
- [45] **Vitalij K. Pecharsky, Karl A. Gschneidner Jr.** *Magnetocaloric effect and magnetic refrigeration.* *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 1999, 44-56.
- [46] **Yu, B.F., Gao, Q., Zhang, B., Meng, X.Z., Chen, Z., 2003.** *Review on research of room temperature magnetic refrigerant.* *Int. J. Refrigeration* 26, 622–636.
- [47] **Yu, B., Liu, M., Egolf, P.W., Kitanovski, A., 2010.** *A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before 2010.* *Int. J. Refrigeration* 33, 1029–1060.
- [48] **Zimm, C., Jastrab, A., Sternberg, A., Pecharsky, V., Gschneidner, K., Osborne, M., et al., 1998.** *Description and performance of a near room temperature magnetic refrigerator.* *Adv. Cryo. Eng.* 43, 1759–1766.
- [49] **Zimm, C., Boeder, A., Chell, J., Sternberg, A., Fujita, S., Fujieda, S., et al., 2006.** *Design and performance of a permanent magnet rotary refrigerator.* *Int. J. Refrigeration* 29 (8), 1302–1306.
- [50] **Zimm, C., Boeder, A., Chell, J., Russek, S., Sternberg, A., 2007.** *Design and initial performance of magnetic refrigerator with a rotating permanent magnet.* 2nd International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature, Portoz, Slovenia.