

## Treball final de grau

**Estudi:**

**Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

**Títol:**

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

**Document:**

Memòria i annexos

**Alumne:**

Eloi Fanals i Mola

**Tutor:** Joan Josep Sunyol / Alexandre Deltell

**Departament:** Física i EMCI

**Àrea:** Física Aplicada / MMT

**Convocatòria (mes/any)**

Juny 2020



## RESUM

Actualment, la refrigeració és una tecnologia molt comuna arreu del món. Els sistemes de refrigeració més comuns actualment, consisteixen en la utilització d'evaporació i condensació d'un refrigerant on moltes vegades s'utilitzen substàncies que la seva expulsió en l'atmosfera contamina l'aire i provoca l'efecte hivernacle. A més a més, aquest tipus de sistema té moltes ineficiències una de les quals no pot ser superada i que provoca que sota cap circumstància un cicle de refrigeració convencional obtingui el màxim rendiment termodinàmic possible determinat per Carnot. A causa dels grans problemes que comporten els sistemes de refrigeració convencionals, durant els últims anys s'ha intensificat els processos que busquen trobar sistemes alternatius de refrigeració, un dels principals candidats a aconseguir-ho és la refrigeració magnètica.

Tot sistema de refrigeració consisteix en el transport d'energia d'un espai a un altre provocant que la temperatura del primer espai es redueixi fins a aconseguir una temperatura requerida. Aquest procés es pot veure a partir del gràfic d'entropia-temperatura on les diferents potències queden reflectides en superfícies fàcilment calculables en molts casos. En els cicles convencionals es pot veure molt fàcilment on hi ha la potència de refrigeració i el seu valor perquè els diferents processos es produeixen a pressió constant i la temperatura d'evaporador és constant cosa que provoca que el càlcul de la potència sigui directa. D'altra banda en els cicles de refrigeració magnètica és necessari un càlcul més elaborat per trobar el valor que correspon a la potència de refrigeració.

Els cicles de refrigeració magnètica consisteixen en l'efecte magnetocalòric (MCE) que es produeix en un material ferromagnètic quan en aquest se li aplica un camp magnètic a temperatures pròximes a la de Curie permeten una disminució important de l'entropia magnètica i incrementant la temperatura del material magnetocalòric, cosa que permet que un refrigerant neutre agafi la calor del material magnetocalòric i el transporti al focus de calor corresponent. Aquest procés utilitza la variació d'entropia magnètica entre els focus per extreure energia i refrigerar l'espai.

Els cicles de refrigeració magnètica utilitzen materials neutres amb l'entorn cosa que permet no deixar substàncies que danyen l'atmosfera, mentre els refrigerants que es poden utilitzar poden ser fàcilment aigua o altres substàncies neutres. A més a més, el cicle de refrigeració magnètica té la possibilitat d'aconseguir obtenir el cicle de Carnot cosa que exemplifica les esperances dels acadèmics en substituir els cicles de refrigeració convencional per refrigeració magnètica.

El treball consta de dues grans parts pràctiques: una comparació entre alguns dels prototips de refrigeració magnètica existents i els seus cicles convencionals estàndards equivalents

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

sense sobreescalfament ni subrefredament, l'altra part consisteix en el disseny d'un prototip conceptual i el càlcul del seu COP teòric, cosa que permet veure posteriorment el rendiment del disseny.

La comparació entre els prototips i els cicles convencionals consisteix en l'exposició de resultats de diferents prototips i els seus resultats publicats amb totes les dades rellevants com la temperatura de cada focus, la potència de refrigeració, les pèrdues del prototip, el COP d'aquest i el %  $COP_{id}$ , COP ideal o de Carnot. Aquests prototips són cinc amb els resultats presentats, tenen el seu cicle convencional estàndard equivalent en temperatures de focus, ja que en el cicle ideal determinen el valor del  $COP_{id}$ .

El disseny del prototip conceptual consisteix en l'estudi del camp magnètic, la potència de la bomba i la potència del motor necessària per fer girar el rotor. El disseny triat ha estat basat a partir d'un dels prototips analitzats en la comparació i alhora és un prototip basat en AMR, que és considerat el millor cicle existent després el de Carnot i que és el més utilitzat en els diferents prototips presentats i analitzats en publicacions. Aquest disseny és d'un prototip rotatiu cosa que permet un procés continu. El material magnetocalòric utilitzat en el disseny és el gadolini però també s'ha analitzat els camps magnètics resultants de diferents aliatges Heusler obtinguts del grup de recerca en materials i termodinàmica de la Universitat de Girona.

En referència al disseny de la secció principal, aquesta té dues variants amb un estator igual en els dos casos però un rotor diferent permeten que s'aconsegueixi uns resultats de camp magnètic diferents i així dues màquines diferents.

D'una banda, hi ha els dos dissenys provocat que el càlcul que correspon al moviment del rotor tingui dos resultats diferents permeten una clara diferenciació entre ells, ja que aquest valor ha estat el més important en el que fa a pèrdues de la màquina. D'altra banda, hi ha el càlcul de la bomba del refrigerant, que en aquest cas és aigua, que està lligat al disseny de l'estator, cosa que permet obtenir un mateix resultat per les dues opcions analitzades. Pel que fa als resultats obtinguts dels dos camps magnètics han obligat a la utilització de dues funcions diferents pel càlcul de la capacitat de refrigeració.

Els materials analitzats del grup de recerca han mostrat uns comportaments magnètics molt òptims que el gadolini, ja que la seva permeabilitat relativa és superior al gadolini i per això els camps magnètics resultants dintre de material magnetocalòric. Aquests resultats han estat obtinguts amb només un dels dos dissenys proposat, el disseny amb un diàmetre exterior superior.

Per concloure, en aquest estudi s'ha comparat diferents resultats de prototips aconseguits per diferents grups d'experts amb alguns dels resultats molt positius i amb grans perspectives

d'aconseguir produir un cicle de refrigeració magnètica pel consumidor amb rendiments energètics similars o superiors als obtinguts pels actuals sistemes de refrigeració convencional. També s'ha dissenyat un prototip conceptual que té uns resultats finals positius, tant de valor del COP final com la simplicitat del disseny.



## NOMENCLATURA

Símbol	Significat	Unitats
E	Energia d'un sistema	J
$E_c$	Energia cinètica	J
$E_p$	Energia potencial	J
U	Energia interna	J
$\Delta E$	Variació energia d'un sistema	J
$\Delta E_c$	Variació energia cinètica	J
$\Delta E_p$	Variació energia potencial	J
$\Delta U$	Variació d'energia interna	J
m	Massa	kg
$\dot{m}$	Cabal màssic	kg/s
v	Velocitat	m/s
g	Acceleració estàndard de la gravetat	m/s <sup>2</sup>
z	Altura des d'un punt de referència	m
p	Pressió	Pa
V	Volum	m <sup>3</sup>
$\dot{V}$	Cabal volumètric	m <sup>3</sup> /s
$\rho$	densitat	kg/m <sup>3</sup>
H	Entalpia	J
h	Entalpia específica	J/kg
S	Entropia	J/K
s	Entropia específica	J/kg·K
$\sigma_{\text{cicle}}$	Variació d'entropia en un cicle termodinàmic	J/K
W	Treball	J
F	Força	N
x	Distància	m

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

A	Àrea	$m^2$
$\delta W$	Variació de treball	J
E	Intensitat del camp elèctric	N/C
P	Moment elèctric per unitat de volum	C·m
$\mu_0$	Permeabilitat del buit	N/A <sup>2</sup>
H	Intensitat del camp magnètic	T
$M_M$	Moment magnètic per unitat de volum	J/T
M	Magnetització	A/m
Q	Calor	J
$\dot{W}$	Potència	w
$\dot{Q}$	Potència calorífica	w
T	Temperatura	K
$T_b$	Temperatura de la superfície del sòlid	K
$T_C$	Temperatura focus fred	K
$T_H$	Temperatura focus calent	K
$\dot{W}_c$	Potència consumida pel compressor	w
$\dot{W}_t$	Potència produïda per la turbina	w
$S_T$	Entropia total	J/K
$S_m$	Entropia magnètica	J/K
$S_r$	Entropia de xarxa	J/K
$S_e$	Entropia electrònica	J/K
$\sigma_{S-B}$	Constant de Stefan-Boltzmann	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
$\Delta T_{ad}$	Variació de temperatura isoentròpica	K
$\Delta S_m$	Variació d'entropia isotèrmica	J/K
$\epsilon$	Emissivitat	
h	Coeficient de transferència de calor per convecció	$W/m^2 \cdot K$
$\kappa$	Conductivitat tèrmica	$W/m \cdot K$



$u$	Energia interna específica	J/kg
$\sigma$	Magnetització específica	A/kg·m
$q$	Calor específic	J/kg
$\dot{Q}_{in}$	Potència calorífica absorbida a l'evaporador	w
$\dot{Q}_{out}$	Potència calorífica donada per al condensador	w
$\dot{Q}_c$	Potència calorífica del focus calent	w
$\dot{Q}_f$	Potència calorífica del focus fred o de refrigeració	w
$T_c$	Temperatura del focus calent per refrigeradors magnètics	K
$T_f$	Temperatura del focus fred per refrigeradors magnètics	K
$\Delta T_{span}$	<i>Working temperature span</i>	K
RC	Capacitat de refrigeració	J/kg
$\psi$	Coeficient d'esfericitat	-
$\eta$	Rendiment	-
$\emptyset$	Diàmetre	m
$\omega$	Velocitat angular	rad/s
$M_a$	Moment	N·m
COP	<i>Coefficient Of Performance</i>	-
COP <sub>id</sub>	COP de Carnot o ideal	



# ÍNDIX

Resum.....	I
Nomenclatura.....	V
Índex .....	IX
Índex de figures .....	XIII
Índex de gràfiques .....	XV
Índex de taules.....	XVII
1 Introducció .....	1
1.1 Antecedents.....	1
1.2 Objecte .....	1
1.3 Abast i especificacions .....	1
1.3.1 Abast .....	1
1.3.2 Especificacions.....	2
2 Fonaments teòrics: Conceptes termodinàmics.....	3
2.1 Energia .....	3
2.1.1 Tipus d'energia.....	3
2.1.2 Treball.....	5
2.2 Lleis de la Termodinàmica.....	7
2.2.1 1a Llei de la Termodinàmica .....	7
2.2.2 2a Llei de la Termodinàmica .....	7
2.3 Mesura del rendiment en cicles termodinàmics.....	8
2.3.1 COP.....	8
2.3.2 RC i ER.....	8
3 Fonaments Teòrics: Refrigeració convencional.....	9
3.1 Teoria dels sistemes de refrigeració per vapor.....	9
3.1.1 Descripció del cicle termodinàmic estàndard .....	9
3.2 Cicles de refrigeració convencional .....	10
3.2.1 Cicle Carnot.....	10
3.2.2 Cicles de refrigeració en cascada .....	11

# Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

3.2.3	Cicle de refrigeració Brayton .....	12
3.2.4	Cicle de refrigeració per absorció .....	13
4	Fonaments Teòrics: Refrigeració magnètica .....	15
4.1	Introducció .....	15
4.2	Historia de l'Efecte Magnetocalòric .....	15
4.3	Teoria de l'Efecte Magnetocalòric (MCE) .....	16
4.3.1	Termodinàmica de MCE .....	18
4.3.2	Transicions de fase .....	19
4.3.3	Característiques dels Materials per a Refrigeració Magnètica .....	21
4.4	Cicles de refrigeració magnètica .....	21
4.4.1	Cicle Carnot.....	21
4.4.2	Cicle Brayton .....	22
4.4.3	Cicle Ericsson.....	23
4.4.4	Cicles magnètics en cascada .....	24
4.4.5	Cicle de regenerador magnètic actiu (AMR) .....	25
5	Comparació refrigeració convecional vs magnètica .....	29
5.1	Introducció .....	29
5.2	Anàlisi inicial .....	29
5.3	La comparació entre prototips reals i cicles convencionals.....	30
5.4	Conclusions .....	34
6	Disseny d'un prototip conceptual .....	37
6.1	Introducció .....	37
6.2	El camp magnètic .....	37
6.3	El consum de potència del prototip.....	39
6.3.1	La potència del motor .....	39
6.3.2	La potència de la bomba .....	40
6.4	El calor de refrigeració.....	41
6.5	El COP de refrigeració del prototip .....	42
6.6	Anàlisi dels camps magnètics dels materials del grup de recerca.....	43

6.7	Conclusions .....	44
7	Resum del pressupost .....	47
8	Conclusions .....	49
9	Bibliografia .....	51
Annex A:	Taules de resultats de les comparacions entre cicles .....	55
	Taules de resultats .....	55
	Taules d'interpolacions dels cicles convencionals .....	57
Annex B:	Disseny i magnetització.....	63
	Disseny del prototip conceptual.....	63
	Camps magnètics dels aliatges de recerca de la UdG.....	67
Annex C:	Càlcul del consum de potència del motor .....	73
Annex D:	Càlcul del consum de potència de la bomba.....	75
Annex E:	Càlcul de la capacitat de refrigeració .....	77
Annex F:	Pressupost.....	79



## ÍNDIX DE FIGURES

Figura 1: Cicle de Carnot. Imatge extreta de Moran i Shapiro (2006). .....	11
Figura 2: Esquema d'un cicle de refrigeració en cascada amb dos cicles interiors. Imatge extreta de Moran i Shapiro (2006). .....	12
Figura 3: a) Esquema del cicle Brayton amb els seus components. b) Diagrama T-s del cicle Brayton. Imatge extreta de Moran i Shapiro (2006). .....	13
Figura 4: Esquema d'un sistema de refrigeració per absorció simple amb solució d'amoníac i aigua. Imatge extreta de Moran i Shapiro (2006). .....	14
Figura 5: Relació entre l'entropia i la temperatura en l'aplicació d'un camp magnètic sobre un material ferromagnètic. Imatge extreta de Romero (2013). .....	16
Figura 6: Ordenació dels spins magnètics de forma adiabàtica abans i després de l'aplicació d'un camp magnètic. Imatge extreta de Romero (2013). .....	17
Figura 7: Ordenació dels spins magnètics de forma isotèrmica abans i després de l'aplicació d'un camp magnètic. Imatge extreta de Romero (2013). .....	18
Figura 8: Diagrama esquemàtic T-S sobre la transició de primer ordre amb dos camp magnètics $H_1$ i $H_0$ . Imatge extreta de Romero (2013). .....	20
Figura 9: Diagrama T-S del cicle Carnot d'un refrigerador magnètic. Imatge extreta de Romero (2013). .....	22
Figura 10: Diagrama T-S d'un cicle Brayton de refrigeració magnètica amb regeneració. Imatge extreta de Romero (2013). .....	23
Figura 11: Diagrama T-S d'un cicle Ericsson amb regeneració. Imatge extreta de Romero (2013). .....	24
Figura 12: Diagrama T-S d'un cicle de refrigeració magnètica amb dos cicles iguals. Imatge extreta de Romero (2013). .....	25
Figura 13: Il·lustració esquemàtica d'un refrigerador magnètic amb cicle AMR. Imatge extreta de Romero (2013). .....	26
Figura 14: Exterior del prototip de Chaudron et al. (2018). Imatge extreta de Chaudron et al. (2018). .....	31
Figura 15: Prototip FAME Cooler. Imatge extreta de Huang et al. (2019) .....	32
Figura 16: a) Exterior del prototip d'Eriksen et al.(2015). b) Esquema de la secció transversal del prototip. Imatge extreta de Eriksen (2016). .....	33
Figura 17: Imatge del prototip de Trevizoli et al (2016). Imatges extreta de Trevizoli et al (2016). .....	33
Figura 18: Prototip d'Engelbrecht et al. (2012). Imatge extreta d'Engelbrecht et al. (2012). .....	34

## Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

Figura 19: Camp magnètic del prototip A. Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM. ....	38
Figura 20 :Camp magnètic del prototip B. Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM. ....	39
Figura 21: Esquema del sistema de flux d'aigua. Elaboració pròpia .....	40
Figura 22: Variació d'entropia del Gd. Extreta de Huang et al. (2019) .....	41
Figura 23: Dibuix del prototip B utilitzant el programa FEMM amb tots els diferents elements que el formen. Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.....	63
Figura 24: Dibuix del prototip A utilitzant el programa FEMM amb tots els diferents elements que el formen. Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.....	64
Figura 25: Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric $Mn_{50}Ni_{40}Sn_{10}$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM. ....	67
Figura 26: Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric $Mn_{50}Ni_{42,5}Sn_{7,5}$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.....	68
Figura 27: Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric $Mn_{50}Ni_{45}Sn_5$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM. ....	69
Figura 28: Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric $Ni_{48}Mn_{36}Sn_{14}Cu_2$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM. ....	70
Figura 29: : Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric $Ni_{47}Mn_{36}Sn_{14}Ti$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM. ....	71
Figura 30: Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric $Ni_{49}Mn_{36}Sn_{14}Cu$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.....	72



## ÍNDIX DE GRÀFIQUES

Gràfica 1: RC en funció $T_{span}$ . Elaboració pròpia. ....	42
Gràfica 2: Potència de refrigeració en funció de $T_{span}$ . Elaboració pròpia. ....	42
Gràfica 3: COP dels dos prototips en funció de $T_{span}$ amb la $T_H=295K$ . Elaboració pròpia. .....	43
Gràfica 4: Regressió polinòmica de cinquè grau a partir de la corba 1T del Gd. Elaboració pròpia.....	77
Gràfica 5: Regressió polinòmica de cinquè grau a partir de la corba 1,25T del Gd. Elaboració pròpia.....	77



## ÍNDIX DE TAULES

Taula 1: Resultats de la recerca de membres de la UdG. Els tres primer resultats ha estat extrets de Coll, R., (2018) i els altres tres són resultats preliminars dels treballs predoctorals de Wederni, A. ....	43
Taula 2: Exemples de MCM amb valors $RC_{\text{eff}}$ elevats amb les seves temperatures d'operació. Valors obtinguts a partir de Zhang et al. (2018). Elaboració pròpia. ....	55
Taula 3: Resultats dels diferents cicles convencionals equivalents. Elaboració pròpia. ...	55
Taula 4: Resultats dels cicles de refrigeració magnètica a partir de prototips reals. Elaboració pròpia. ....	56
Taula 5: Valors dels focus del cicle complementari al prototip de Chaudron et al (2018). Elaboració pròpia. ....	57
Taula 6: Càlculs per trobar els valors $h_2$ mitjançant interpolacions bilineals del cicle complementari al prototip de Chaudron et al (2018). Elaboració pròpia. ....	57
Taula 7: Valors dels focus del cicle complementari al prototip de Huang et al. (2019). Elaboració pròpia. ....	58
Taula 8: Càlculs per trobar els valors $h_2$ mitjançant interpolacions bilineals del cicle complementari al prototip de Huang et al. (2019). Elaboració pròpia. ....	58
Taula 9: Valors dels focus del cicle complementari al prototip de Eriksen (2016). Elaboració pròpia. ....	59
Taula 10: Càlculs per trobar els valors $h_2$ mitjançant interpolacions bilineals del cicle complementari al prototip de Eriksen (2016). Elaboració pròpia. ....	59
Taula 11: Valors dels focus del cicle complementari al prototip de Trevizoli et al. (2016). Elaboració pròpia. ....	60
Taula 12: Càlculs per trobar els valors $h_2$ mitjançant interpolacions bilineals del cicle complementari al prototip de Trevizoli et al. (2016). Elaboració pròpia. ....	60
Taula 13: Valors dels focus del cicle complementari al prototip de Engelbrecht et al. (2012). Elaboració pròpia. ....	61
Taula 14: Càlculs per trobar els valors $h_2$ mitjançant interpolacions bilineals del cicle complementari al prototip de Engelbrecht et al. (2012). Elaboració pròpia. ....	61
Taula 15: Taula del càlcul de masses. Elaboració pròpia. ....	73
Taula 16: Taula de càlcul i resultats de la potència del motor. Elaboració pròpia. ....	74
Taula 17: Taula de càlcul i resultats de la potència de la bomba. Elaboració pròpia. ....	76



# MÈMORIA

## 1 INTRODUCCIÓ

### 1.1 Antecedents

Actualment, els efectes del canvi climàtic es tornen cada cop més visibles en la vida de les persones, per això els acadèmics i les empreses fa temps que estan buscant diferents maneres amb l'objectiu de reduir l'emissió dels diferents causants d'aquest com els gasos d'efecte hivernacle.

Els principals camps d'actuació han estat i són en el camp de l'energia i el transport, ja que són els principals causants d'aquest problema, però hi ha també experts que busquen solucions a problemes més enfocats en sistemes més petits però molt necessaris per a la indústria i la llar com és la refrigeració.

Els sistemes de refrigeració convencionals utilitzen diferents refrigerants els quals l'emissió d'aquests en l'atmosfera provoca uns perjudicis molt elevats pel planeta. Els diferents experts han estat buscant substituïts que permetin millorar el rendiment energètic obtingut a partir de la utilització de les màquines de refrigeració convencionals i que alhora utilitzin substàncies neutres en el procés. En el conjunt de possibles substituïts, hi ha la refrigeració magnètica que alhora és un dels principals candidats a aconseguir-ho.

### 1.2 Objecte

L'objecte d'aquest estudi és triple, el primer, comparar els cicles de refrigeració magnètica amb els cicles convencionals.

El segon, és l'avaluació del potencial energètic màxim dels cicles de refrigeració magnètica.

Finalment, dissenyar conceptualment un prototip elemental d'un refrigerador magnètic.

### 1.3 Abast i especificacions

#### 1.3.1 Abast

Anàlisis i comparació de cicles de refrigeració convencional de tipus estàndard sense considerar el sobreescalfament a l'aspiració del compressor i el subrefredament a la sortida del condensador.

Avaluació del potencial energètic màxim dels cicles de refrigeració magnètica a partir dels aliatges metàl·lics basats en Gd i de tipus Heusler.

Disseny conceptual d'un prototip d'un sistema de refrigeració magnètica, es valorarà la viabilitat d'emparar els aliatges produïts en l'activitat de recerca prèvia del grup de recerca en

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

materials i termodinàmica de la Universitat de Girona, i s'inclourà el disseny del sistema de generació dels camps magnètics externs necessaris per al cicle. No es construirà el prototip.

### **1.3.2 Especificacions**

El promotor ha especificat quins són els requisits i desitjos que s'esperen de l'estudi.

El primer requisit consisteix en la comparació entre els cicles convencionals i el de refrigeració magnètica que permetin fàcilment veure el potencial dels sistemes de refrigeració convencionals, a partir dels sistemes termodinàmics estàndards sense pèrdues, i els de refrigeració magnètica, mitjançant una anàlisi d'alguns dels prototips existents.

El segon requisit consisteix en una avaluació del potencial energètic dels cicles de refrigeració magnètica.

Finalment, l'últim requisit consisteix en un disseny d'un prototip conceptual amb els càlculs per obtenir valors finals útils i alhora es valori la utilització dels aliatges obtinguts a partir de la recerca feta a la Universitat de Girona en aquest mateix prototip.

## 2 FONAMENTS TEÒRICS: CONCEPTES TERMODINÀMICS

### 2.1 Energia

#### 2.1.1 Tipus d'energia

##### 2.1.1.1 La calor

Hi ha diferents maneres que permetin a un sistema interactuar amb el seu entorn. Una d'aquestes maneres és el treball, però n'hi ha altres com la interacció d'un sistema calent amb un gas més fred. Aquests tipus d'interacció s'anomena transferència d'energia per calor.

El símbol utilitzat per representar l'energia transmesa per calor és la  $Q$ . Per tal de determinar el sentit del valor que rep la calor s'utilitza un conveni de signes que coincideixi amb l'aplicat al treball.

- $Q < 0$ : el sistema desprèn calor.
- $Q > 0$ : el sistema absorbeix calor.

La calor no és una propietat d'un cos, com el treball, i el seu diferencial és  $\delta Q$ . La velocitat de transmissió de la calor es denota amb  $\dot{Q}$ .

$$Q = \int_1^2 \delta Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} \cdot dt \quad (2.1.1)$$

Hi ha diferents maneres de transmetre la calor des d'un sistema a l'entorn. Aquests mètodes són conducció, radiació i convecció.

#### Conducció

La conducció consisteix a transmetre en sòlids, líquids i gasos, on l'energia es transmet des de partícules més energètiques a menys energètiques a causa d'interaccions entre aquestes, aquest mètode de transmissió segueix la llei de Fourier. Un exemple molt clar d'aquesta situació és una paret d'una edificació on la temperatura interior és diferent de l'exterior.

$$\dot{Q}_x = -\kappa \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.1.2)$$

La  $\dot{Q}_x$  representa la calor transmesa en la direcció  $x$ , la  $\kappa$  representa la conductivitat tèrmica del material, l' $A$  representa l'àrea de la paret i  $\frac{dT}{dx}$  és el gradient de variació en funció de la profunditat de la paret.

#### Radiació

La radiació tèrmica és emesa degut al canvi en les configuracions electròniques dels àtoms i molècules. L'energia es transporta a partir d'ones electromagnètiques, les quals no

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

requereixen cap mitjà de transport i es poden desplaçar pel buit. Aquest mètode de transmissió segueix la llei de Stefan-Boltzmann.

$$\dot{Q}_e = \varepsilon \cdot \sigma_{S-B} \cdot A \cdot T_b^4 \quad (2.1.3)$$

La  $\dot{Q}_e$  representa la potència transmesa mitjançant la radiació tèrmica. Aquest valor ve determinat per la constant de Stefan-Boltzmann  $\sigma_{S-B}$ , l'emissivitat  $\varepsilon$ , l'àrea de la superfície del sòlid  $A$ , la temperatura de la superfície  $T_b$  elevat a la quarta

### Convecció

La transmissió d'energia entre la superfície sòlida i un gas o líquid adjacent a causa de la diferència entre temperatures  $T_b$ , pel sòlid, i  $T_f$ , pel fluid. Aquesta situació és coneguda com a convecció i segueix l'equació empírica coneguda com la llei de refredament de Newton. La  $h$  representa el coeficient de transferència de calor per convecció i l' $A$  representa l'àrea de transmissió. A partir d'aquestes variables es pot aconseguir obtenir la potència  $\dot{Q}_c$ , que representa l'energia transmesa mitjançant la convecció per unitat de temps.

$$\dot{Q}_c = h \cdot A \cdot (T_b - T_f) \quad (2.1.4)$$

#### 2.1.1.2 Energia interna

Propietat extensiva d'un cos i és representada amb el símbol  $U$ . L'energia interna és un dels tres tipus d'energia macroscòpica juntament amb l'energia potencial i la cinètica. El canvi d'energia interna s'expressa com a  $\Delta U$  i representa  $U_2 - U_1$ .

La variació de l'energia del sistema és la suma de les variacions de les diferents energies que conformen el sistema.

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U \quad (2.1.5)$$

#### 2.1.1.3 Entalpia

Propietat termodinàmica que representa un valor d'energia que representa una suma recurrent en moltes anàlisis termodinàmiques, l'energia interna  $U$  amb el producte de la pressió  $p$  i el volum  $V$ . Aquesta situació provoca que es posés un nom a aquesta suma tan repetitiva, entalpia, definida pel símbol  $H$ .

$$H = U + p \cdot V \quad (2.1.6)$$

#### 2.1.1.4 Entropia

Propietat extensiva que representa la reversibilitat d'un cicle, també és una mesura del desordre d'un sistema. A partir de l'equació de Clausius es pot determinar que la integral cíclica de la calor produïda entre la temperatura ha de ser més petit o igual a 0.



$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b \leq 0 \quad (2.1.7)$$

Un cicle termodinàmic té un valor d'entropia que permet saber el comportament d'irreversibilitat del cicle.

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_b = -\sigma_{cicle} \quad (2.1.8)$$

$\sigma_{cicle} = 0$  cicle reversible.

$\sigma_{cicle} > 0$  cicle irreversible.

$\sigma_{cicle} < 0$  impossible.

### 2.1.1.5 Altres tipus d'energia

#### 2.1.1.5.1 Energia cinètica

Propietat extensiva d'un cos que a partir de la massa d'aquest i la magnitud de la velocitat relativa instantània referida en un sistema de coordenades permet ser assignat un valor.

La quantitat d'energia cinètica d'un cos en un instant és  $\frac{1}{2} mv^2$ , on  $m$  representa la massa i  $v$  representa la velocitat.

L'energia cinètica és un valor escalar, cosa que permet que obtenir de forma directa el seu canvi de valor.

$$\Delta Ec = Ec_2 - Ec_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad (2.1.9)$$

#### 2.1.1.5.2 Energia potencial gravitatòria

Propietat extensiva d'un cos el valor del qual és escalar i representa l'energia d'un cos degut a una força gravitacional respecte a un punt de referència.

La quantitat d'energia potencial d'un cos és  $mgz$ , on la  $m$  representa la massa del cos, la  $g$  representa la constant gravitacional i la  $z$  representa la distància que es considera com a punt inicial, normalment s'agafa la superfície de la Terra.

La variació d'energia potencial mostra la quantitat mínima d'energia necessària per a desplaçar un objecte de massa  $m$  d'una altura inicial  $z_1$  a una altura final  $z_2$ .

$$\Delta Ep = Ep_2 - Ep_1 = m \cdot g \cdot (z_2 - z_1) \quad (2.1.10)$$

### 2.1.2 Treball

Un sistema fa treball en el seu entorn si l'efecte en tota cosa externa al sistema pot haver provocat una variació d'energia en un cos a causa d'un desplaçament.

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F \cdot dx \quad (2.1.11)$$

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

El treball és un mitjà per a transferir energia. El terme s'utilitza quan l'energia és transferida i emmagatzemada i no es refereix al fet transferit entre dos sistemes o la cosa emmagatzemat en dos sistemes sinó quan es tracta d'un flux d'energia d'un sistema a l'altre a causa d'un desplaçament.

Per tal de diferenciar si un sistema rep o dóna energia s'utilitza un conveni de signes. En aquest estudi utilitza un, però pot ser utilitzat el contrari en altres treballs d'altres autors.

- $W < 0$ : treball rebut pel sistema
- $W > 0$ : treball fet pel sistema

El treball no és una propietat del sistema o de l'entorn. A més a més, els límits de l'integral del treball que la defineixen no poden ser interpretats com a valors entre dos estats diferents. La noció del treball en un estat no té sentit, per això la integral no pot ser mai indicada com a  $W_1 - W_2$ .

La diferència del treball,  $\delta W$ , es considera inexacta, perquè en general no pot ser avaluada sense especificar els detalls del procés.

### 2.1.2.1 Potència

Moltes de les variables termodinàmiques requereixen la variable temps en els seus anàlisis. La velocitat de transferència d'energia s'anomena *potència* i es denota amb  $\dot{W}$ . La potència que representa energia per unitat de temps es determina com la derivada del treball, o bé en mecànica com la força (F) multiplicat per la velocitat (v).

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \dot{W} \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} F \cdot v \cdot dt \quad (2.1.12)$$

### 2.1.2.2 Treball d'expansió i compressió

El treball realitzat per un volum de líquid o gas quan hi ha canvis en el seu volum. La força (F) que fa un gas sobre una superfície és causada per la pressió (p) que fa el líquid i l'àrea (A) que afecta. El treball és força per distància, això permet que l'àrea multiplicada per la distància formen un volum (V).

$$\delta W = \int_{x_1}^{x_2} p \cdot A \cdot dx = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV \quad (2.1.13)$$

Per tal de poder resoldre la integral que determina  $\delta W$ , es necessita una relació entre la pressió del gas en moviment i el volum del sistema. Aquesta relació és molt difícil o impossible d'aconseguir per les compressions i expansions reals, ja que els mètodes de mesura només donen una aproximació de la pressió que entra o surt del mecanisme.

També hi ha altres equacions similars que representen  $\delta W$ .

$$\delta W = \int -E \cdot d(V \cdot P) = \int -\mu_o \cdot H \cdot d(V \cdot M_M) \quad (2.1.14)$$

En la primera integral, hi ha l'equació corresponent a un camp elèctric uniforme, mentre en la segona integral hi ha l'equació per a un camp magnètic uniforme. La  $V$  representa el volum, la  $E$  representa el vector de la força del camp i la  $P$  el vector el moment elèctric dipolar per unitat de volum. Similar a la primera integral tenim les variables de la segona, on la  $H$  representa el vector del camp magnètic, la  $M_M$  el moment magnètic dipolar per unitat de volum i la  $\mu_0$  és la constant de permeabilitat en el buit.

## 2.2 Lleis de la Termodinàmica

### 2.2.1 1a Llei de la Termodinàmica

Un dels aspectes fonamentals del concepte d'energia és la seva conservació en un sistema tancat sense l'entrada d'energia des de l'exterior, com és el treball o la calor. El balanç d'energia consisteix en la diferència d'energia entre dos instants i la diferència entre la calor i el treball realitzats al sistema.

$$E_2 - E_1 = Q - W \quad (2.2.1)$$

També pot ser aplicada en funció dels temps, la qual cosa permet obtenir la ràtio de canvi del balanç d'energia.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (2.2.2)$$

### 2.2.2 2a Llei de la Termodinàmica

La segona llei de la Termodinàmica té diferents versions de com explicar-la però en enginyeria n'hi ha dues de principals, els principis de Kelvin-Plank i Clausius.

#### Principi de Kelvin-Plank

“És impossible construir una màquina que, operant segons un cicle termodinàmic, cedeixi una quantitat neta de treball a l'entorn quan rep calor procedent d'un únic focus tèrmic.”

El principi de Kelvin-Plank que el procés de convertir completament la calor en treball mitjançant un procés cíclic és impossible.

#### Principi de Clausius

“Cap procés consisteix exclusivament en la transferència de calor des d'una temperatura determinada fins a una temperatura més alta.”

El principi de Clausius afirma que és impossible construir un cicle de refrigeració sense que aquest consumeixi treball.

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

## 2.3 Mesura del rendiment en cicles termodinàmics

### 2.3.1 COP

El COP, sigles de *Coefficient Of Performance*, és el mètode més utilitzat per la societat a l'hora de saber quina capacitat té un aparell termodinàmic transformant potència, normalment elèctrica, a potència calorífica.

En referència a aquest estudi només s'utilitzarà el COP de refrigeració, el qual utilitza la potència calorífica absorbida per l'evaporador ( $Q_{in}$ ) i l'energia consumida pel sistema que correspon a l'energia consumida pel compressor ( $W_c$ ) menys l'energia produïda per la turbina ( $W_t$ ), en molts aparells domèstics no es posa turbina sinó una vàlvula d'expansió que no produeix energia i  $W_t=0$ .

$$COP = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{W}_c - \dot{W}_t} = \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_1) - (h_3 - h_4)} \quad (2.3.1)$$

Un valor molt indicador del rendiment del cicle termodinàmic consisteix a buscar quin percentatge del COP de Carnot, que representa el cicle termodinàmic perfecte, representa el COP obtingut.

$$\% COP_{id} = \frac{COP}{COP_{id}} = \frac{T_H - T_C}{T_C} * COP \quad (2.3.2)$$

### 2.3.2 RC i ER

La RC, sigles de *Refrigerant Capacity*, representa el potencial màxim que té una substància per absorbir calor en els materials magnetocalòrics utilitzats en els cicles de refrigeració magnètica i s'obté a partir de la integració de la variació d'entropia magnètica en funció de la variació temperatura del sistema. L'efecte refrigerant, ER, és l'equivalent de la RC en els cicles convencionals de refrigeració i representa la calor absorbida per l'evaporador, que es pot calcular a partir de la diferència entre les entalpies d'entrada i de sortida,  $h_1$  i  $h_4$ . Les unitats de RC i ER són J/kg.

$$RC = \int_{T_1}^{T_2} S_m(T) dT = h_1 - h_4 = ER \quad (2.3.3)$$

## 3 FONAMENTS TEÒRICS: REFRIGERACIÓ CONVENCIONAL

### 3.1 Teoria dels sistemes de refrigeració per vapor

L'objectiu principal d'un sistema de refrigeració per vapor és transportar la calor d'un espai o objecte a l'exterior. L'espai pot ser una cambra frigorífica, una nevera, etc. Aquest espai té una temperatura de consigna inferior a la temperatura exterior, la qual cosa provoca que es necessita un treball aplicat per aconseguir-ho, tal com afirma la segona llei de la termodinàmica.

El sistema de refrigeració per vapor més comú consta de quatre components: compressor, condensador, vàlvula d'expansió i evaporador. Aquests components formen un circuit tancat que permeten l'existència de quatre estats corresponents als canvis produïts pels quatre components durant el procés.

L'existència de quatre components que modifiquin l'estat termodinàmic del fluid refrigerant provoca que amb l'objectiu de simplificar el sistema s'utilitzi una numeració per identificar els estats.

- **Estat 1:** vapor saturat a pressió baixa.
- **Estat 2s:** vapor sobreescalfat a pressió alta amb la mateixa entropia que l'estat 1.
- **Estat 2:** vapor saturat a pressió alta amb entropia superior a l'estat 1.
- **Estat 3:** líquid saturat a pressió alta.
- **Estat 4:** barreja líquid-vapor a pressió baixa.

#### 3.1.1 Descripció del cicle termodinàmic estàndard

El cicle termodinàmic estàndard conté quatre processos, juntament amb un component cada un que permet aquest procés. Aquests processos tenen unes característiques molt clares que són:

1. **Procés d'1 a 2 o 2s:** compressió que provoca un increment de la pressió en el cas de 2 hi ha un increment de l'entropia i la temperatura resultant mentre en el cas de 2s aquesta és isentròpica que vol dir sense incrementar l'entropia. El component corresponent és el compressor.
2. **Procés de 2 o 2s a 3:** transferència de calor del fluid refrigerant a l'exterior i condensació del fluid fins a l'estat líquid saturat sense variació de pressió. El component corresponent és el condensador.

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

3. **Procés de 3 a 4:** expansió del líquid saturat fins a obtenir una barreja de líquid-vapor a pressió baixa sense variació de l'entalpia. El component corresponent és la vàlvula d'expansió o turbina.
4. **Procés de 4 a 1:** evaporació de la barreja líquid-vapor fins a obtenir vapor saturat sense variació de pressió. El component corresponent és l'evaporador.

En els casos dels processos termodinàmics a pressió constant, la variació d'entalpia coincideix i representa la variació de calor.

## 3.2 Cicles de refrigeració convencional

### 3.2.1 Cicle Carnot

El cicle consisteix en un sistema de quatre fases internes reversibles, dues fases són adiabàtiques i les altres dues són isotermes. Aquest procés permet obtenir el rendiment màxim d'un cicle a partir de dues temperatures: la temperatura alta i la baixa.

El cicle de Carnot té un procés similar al cicle termodinàmic descrit anteriorment. Les principals diferències són:

- El punt 1 no és vapor saturat sinó una barreja líquid-vapor a temperatura baixa però amb la mateixa entropia que el punt 2.
- El punt 2s passa a ser el punt 2 i és vapor saturat a temperatura alta.
- El punt 4 continua essent barreja líquid-vapor però el procés de 3 a 4 passa a ser isentròpic provocant que el punt 4 tingui la mateixa entropia que el punt 3.

El COP de refrigeració corresponent es pot calcular a partir d'una simple operació obtinguda del càlcul de les àrees que corresponents i aquest resultat té el millor rendiment termodinàmic possible.

$$COP_{id} = \frac{\frac{Q_{in}}{\dot{m}}}{\frac{W_c}{\dot{m}} - \frac{W_t}{\dot{m}}} = \frac{\text{àrea } 1-a-b-4-1}{\text{àrea } 1-2-3-4-1} = \frac{T_c}{T_H - T_c} \quad (3.2.1)$$

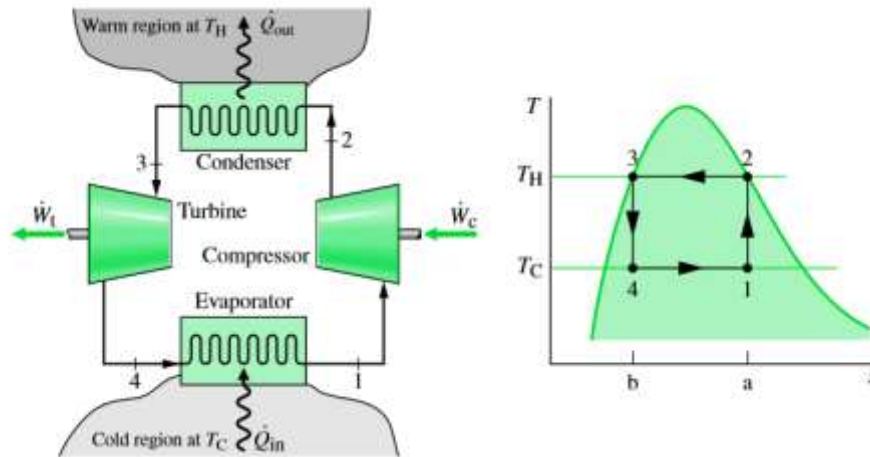


Figura 1: Cicle de Carnot. Imatge extreta de Moran i Shapiro (2006).

Aquest cicle té diferents problemàtiques d'implementació reals, entre aquestes hi ha la incapacitat de la tecnologia actual per la creació de màquines que puguin fer la mateixa feina que un compressor però que permetin treballar amb una barreja de líquid-vapor, cosa que les bombes i compressors actuals no permeten perquè és un cicle ideal sense cap tipus de pèrdues i treballa en tot moment amb barreja líquid-vapor.

### 3.2.2 Cicles de refrigeració en cascada

Els cicles de refrigeració en cascada consisteixen a posar dos o més cicles de refrigeració un a continuació d'un altre connectats per un intercanviador de calor. Aquest intercanviador fa intermediari entre els dos cicles amb l'objectiu de passar d'un cicle a l'altre.

En el cas de dos refrigeradors que tindran el nom de cicle A i cicle B, on la part de l'intercanviador del cicle A que correspon a la part d'alta temperatura del cicle de refrigeració, transmetrà la calor al cicle B que correspon a la part de temperatura baixa del cicle permeten que es pugui aconseguir arribar al condensador del cicle B amb una temperatura superior i aconseguir extreure major calor.

El COP de refrigeració que correspon en aquest tipus de cicle considerant que s'utilitzen vàlvules d'expansió i no turbines és:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{W}_{cA} + \dot{W}_{cB}} \quad (3.2.2)$$

on el  $\dot{W}_{cA}$  i  $\dot{W}_{cB}$  són les potències que s'apliquen als dos compressors.

## Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

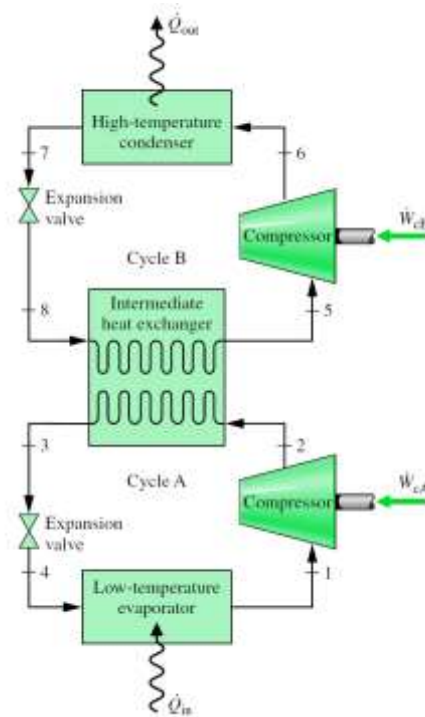


Figura 2: Esquema d'un cicle de refrigeració en cascada amb dos cicles interiors. Imatge extreta de Moran i Shapiro (2006).

### 3.2.3 Cicle de refrigeració Brayton

El cicle de Brayton per refrigeració serveix per a la refrigeració per gas. Aquest fluid no canvia d'estat en tot el procés, però com en tot cicle termodinàmic simple que conté quatre elements el fluid es pot trobar en quatre estats termodinàmics diferents. Els sistemes de refrigeració per gas s'utilitzen per a la condensació de l'aire a temperatures molt baixes i refrigeració de l'aire de les cabines dels avions.

Malgrat que el sistema no té cap canvi d'estat i com els diferents tipus de cicles vists en aquest estudi, el sistema d'anàlisi és molt similar, ja que l'aplicació de les mateixes formules permeten trobar la solució fàcilment.

$$COP = \frac{\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}}{\frac{W_c}{\dot{m}} + \frac{W_t}{\dot{m}}} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1) - (h_3 - h_4)} \quad (3.2.3)$$



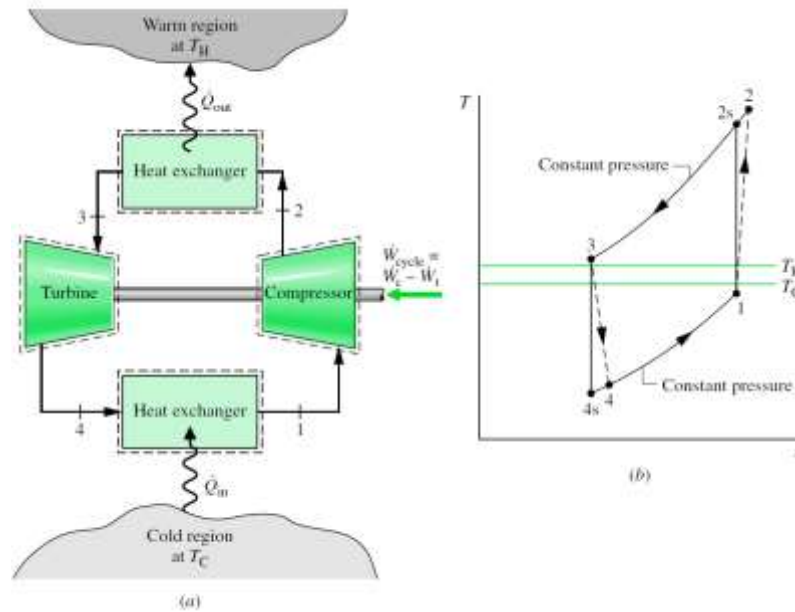


Figura 3: a) Esquema del cicle Brayton amb els seus components. b) Diagrama T-s del cicle Brayton. Imatge extreta de Moran i Shapiro (2006).

### 3.2.4 Cicle de refrigeració per absorció

Els cicles de refrigeració per absorció tenen algunes semblances amb els sistemes de refrigeració convencionals, però hi ha dues grans diferències que els caracteritzen, la utilització d'una bomba i la utilització d'una segona font de calor a alta temperatura.

La utilització de la bomba és deguda per la utilització d'una substància secundària, anomenada absorbent que conjuntament amb el refrigerant s'obté una solució líquida. Aquesta solució és bombejada a alta pressió. A més a més, el volum específic mitjà de la solució és inferior al del refrigerant sol provocant que el treball necessari de la bomba sigui inferior al treball que hauria de fer un compressor per un sistema de compressió de vapor.

La segona font de calor s'utilitza per a la recuperació de l'absorbent de la solució abans que el refrigerant entri en el condensador. El procés requereix una font d'alta temperatura on el vapor o les pèrdues de calor no tenen cap ús econòmic i s'expulsen a l'exterior. Per tal d'alimentar la segona font de calor es poden utilitzar combustibles fòssils o bé sistemes més ecològics com ara geotèrmia o solar.

## Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

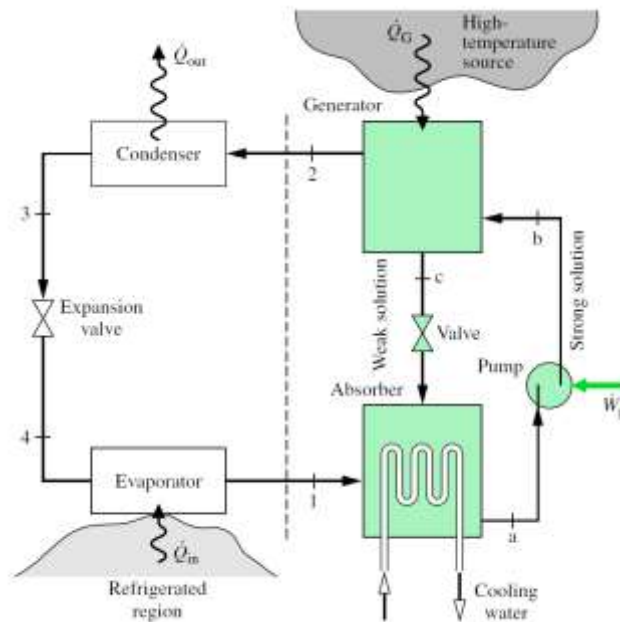


Figura 4: Esquema d'un sistema de refrigeració per absorció simple amb solució d'amoniac i aigua. Imatge extreta de Moran i Shapiro (2006).

Aquest sistema utilitza com a refrigerant l'amoniac i aigua com a absorbent. La utilització de la solució provoca que l'amoniac circuli com en un cicle normal de refrigeració quan passa pel condensador, la vàlvula d'expansió i l'evaporador, però quan arriba a la posició del compressor, aquest és substituït per un absorbidor, una bomba, un generador i una vàlvula. Aquests components que substitueixen al compressor es troben col·locats tal com mostra la Figura 4.

## 4 FONAMENTS TEÒRICS: REFRIGERACIÓ MAGNÈTICA

### 4.1 Introducció

Actualment, el consum d'energia ha anat incrementant ràpidament, això ha provocat un increment del consum de combustibles fòssils i de l'efecte hivernacle a causa del CO<sub>2</sub> i altres gasos contaminants. Aquesta situació ha portat a diferents experts i empreses a dedicar esforços i inversions en la recerca de tecnologies que permetin reduir els causants que provoquen l'efecte hivernacle. Una de les tecnologies que ha rebut molt d'interès per part dels diferents experts ha estat els sistemes de refrigeració a causa del gran impacte que suposen en el consum d'energia.

El procés de refrigeració ha estat aplicat a diferents situacions com preservació dels aliments a partir de la disminució de la temperatura, la disminució de la temperatura d'habitacles o instal·lacions i líquidació de gasos. El procés més comú de refrigeració actualment és la refrigeració de compressió-expansió del vapor. Aquest tipus de refrigeració ha estat utilitzat principalment amb fluids que provoquen l'efecte hivernacle. Un dels grans defectes que té aquest sistema és la incapacitat per no tenir un rendiment termodinàmic igual al de Carnot (màxim rendiment possible). A causa de diferents motius, s'han estat buscant diferents substituïts per la refrigeració convencional i un dels més prometedors és la refrigeració a partir de la variació del camp magnètic en un material neutre ambientalment.

### 4.2 Historia de l'Efecte Magnetocalòric

El 1881, Warburg va detectar per primer cop l'efecte magnetocalòric però no va ser fins al 1918 quan Weiss i Picard van realitzar una descripció teòrica d'aquest efecte. El 1933, la refrigeració magnètica va ser utilitzada per crear un mètode assolir temperatures pròximes a 0 K que actualment encara s'utilitza per aplicacions entre 0 i 4 K però sense cap aplicació en processos continus.

Els anys posteriors no hi va haver cap avanç a causa de la manca de materials magnetocalòrics a temperatures superiors a 20 K fins al 1970 quan Brown va descobrir que en els materials ferromagnètics a temperatures properes a la temperatura de Curie del material, es produïa un canvi en la temperatura del material. A partir d'aquest resultat es van començar a produir diferents experiments a temperatura pròxima a l'ambient utilitzant Gd, però amb resultats limitats per la utilització de regeneradors passius i intercanviadors de calors en el cicle de refrigeració.

El 1982, Barclay i Steyert van patentar l'AMR, *Active Magnetic Regenerator*, que utilitzava el refrigerant com a regenerador del cicle i incrementant el rendiment del procés introduït el 1978 per Steyert (Burdyny, 2012). El 1992, Chen et al. van demostrar que aquest tipus de

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

cicle és el millor cicle possible després del cicle de Carnot (Romero,2013). Actualment, aquests tipus de cicle és el més comú a l'hora de dissenyar i patentar prototips per parts dels acadèmics i empreses.

### 4.3 Teoria de l'Efecte Magnetocalòric (MCE)

MCE consisteix a una resposta tèrmica d'alguns materials quan se'ls hi aplica una variació d'un camp magnètic aplicat, aquesta situació passa amb tots els materials magnètics perquè és una propietat intrínseca. La variació de la temperatura ( $\Delta T_{ad}$ ) i l'entropia magnètica ( $\Delta S_m$ ) es pot veure clarament en un procés adiabàtic i isotèrmic respectivament.

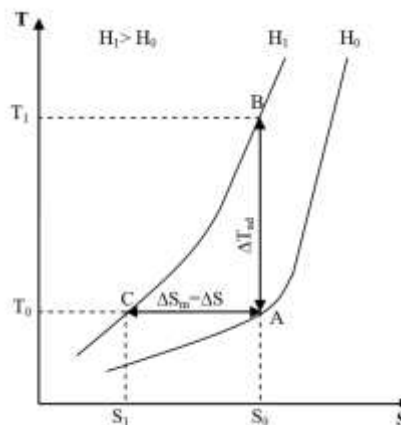


Figura 5: Relació entre l'entropia i la temperatura en l'aplicació d'un camp magnètic sobre un material ferromagnètic. Imatge extreta de Romero (2013).

Una de les característiques més importants d'un material magnètic és la seva entropia, tan l'entropia total ( $S_T$ ) com la magnètica ( $S_m$ ). L'aplicació d'un camp magnètic provoca que l'ordenació magnètica dels espins de les molècules, orientant totes les molècules en la mateixa direcció i alhora ordenant-les i disminuint l'entropia del sistema.

La principal variable que determina l'entropia del sistema és la temperatura, on el seu increment provoca més desordre en les molècules mentre la seva reducció incrementa l'ordre de les molècules. Però hi ha una variable que depèn no només de la temperatura sinó del camp magnètic aplicat.

L'entropia total ( $S_T$ ) d'un material magnètic es pot presentar en general (Pecharsky et al., 2001), a pressió constant, com:

$$S_T(H, T) = S_m(H, T) + S_r(T) + S_e(T) \tag{4.1.1}$$

L'entropia total ve determinada per la suma de l'entropia magnètica ( $S_m$ ), l'entropia de xarxa ( $S_r$ ) deguda per les vibracions dels àtoms de la xarxa cristal·lina i l'entropia electrònica ( $S_e$ ) dels electrons lliures del material (Tishin i Spichkin, 2003).

Quan s'aplica un camp magnètic en una mostra ferromagnètica en condicions adiabàtiques, l'entropia total es manté constant durant el procés. Aquesta situació comporta que modificació de l'entropia magnètica hagi de ser compensada per l'increment de l'entropia de xarxa i l'electrònica. A partir de l'equació de l'entropia total, es pot veure com l'entropia de xarxa i l'entropia electrònica depenen únicament de la temperatura, per això l'única manera d'incrementar l'entropia és l'increment de temperatura ( $\Delta T_{ad}$ ).

Aquesta situació es reverteix quan el camp magnètic deixa d'estar aplicat sobre el material. La conseqüència de la disminució de l'increment de l'entropia magnètica és la recuperació de l'entropia tèrmica inicial juntament amb la disminució de la temperatura del material.

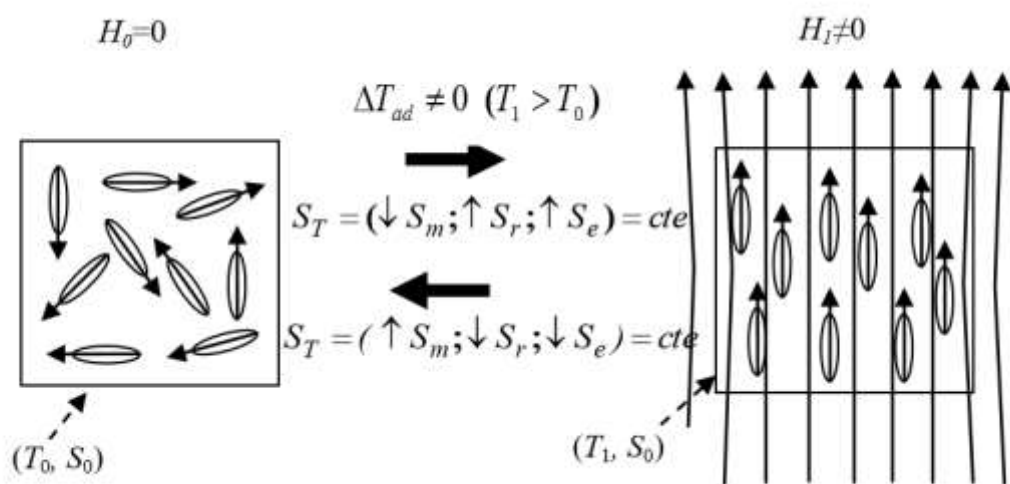


Figura 6: Ordenació dels spins magnètics de forma adiabàtica abans i després de l'aplicació d'un camp magnètic. Imatge extreta de Romero (2013).

En canvi, quan s'aplica el camp magnètic de forma isotèrmica, es provoca una variació de l'entropia que correspon a la disminució de l'entropia corresponent a la variació d'entropia magnètica,  $\Delta S_m$ . Degut a que el procés és isotèrmic i no hi ha variació de temperatura, l'entropia de xarxa i electrònica no varien.

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

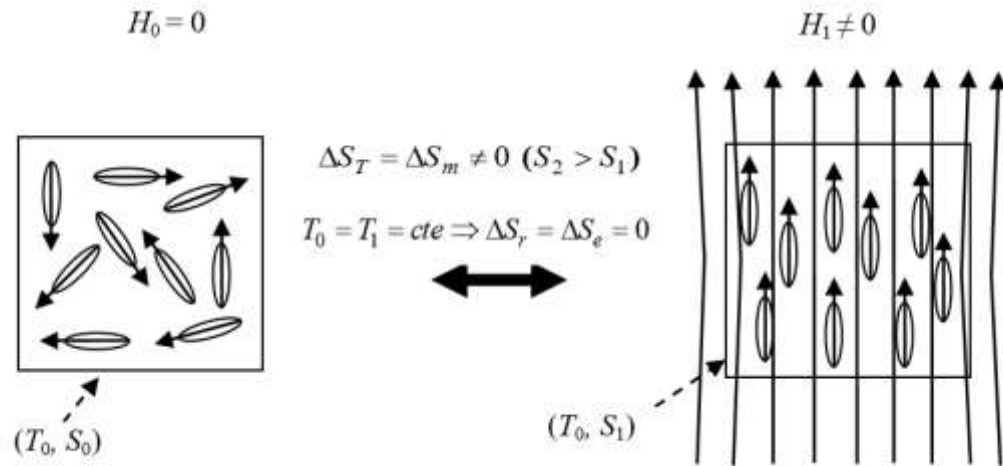


Figura 7: Ordenació dels spins magnètics de forma isotèrmica abans i després de l'aplicació d'un camp magnètic. Imatge extreta de Romero (2013).

### 4.3.1 Termodinàmica de MCE

Aplicant conjuntament els dos Lleis de la Termodinàmica sobre un material ferromagnètic i considerant aquest material com el sistema es pot expressar l'equació de l'energia interna com a:

$$dU = T \cdot dS - p \cdot dV + \mu_0 \cdot H \cdot dM \quad (4.1.2)$$

La H correspon a la intensitat del camp magnètic, la M correspon al moment magnètic i  $\mu_0$  correspon a la constant de permeabilitat del buit, aproximadament igual a la de l'aire.

L'equació del sistema pot ser simplificada degut a la no modificació del volum provocant que  $dV=0$ . Aquesta simplificació permet expressar l'equació així:

$$dU = T \cdot dS + \mu_0 \cdot H \cdot dM \quad (4.1.3)$$

Reescrivint l'equació anterior, en funció dels valors específics per unitat de massa, s'obté:

$$du = T \cdot ds + \mu_0 \cdot H \cdot d\sigma \quad (4.1.4)$$

El canvi d'entropia en funció de la temperatura, T, i el camp magnètic, H, es pot expressar com:

$$ds = (\partial s / \partial T)_H \cdot dT + (\partial s / \partial H)_T \cdot dH \quad (4.1.5)$$

El calor específic c d'una substància que es troba en un estat o paràmetre constant x pot ser definit com a:

$$c_x = (\delta q / dT)_x \quad (4.1.6)$$

A partir de la definició d'entropia específica, equació 2.3.7, i combinat amb el calor específic d'una substància en un procés isobàric, equació 2.3.6, es pot trobar la definició del camp magnètic constant ( $c_{pH}$ ) com l'equació 2.3.8.

$$ds = \delta q/T \quad (4.1.7)$$

$$c_{pH} = T \cdot (\partial s/\partial T)_H \quad (4.1.8)$$

A través d'una relació de Maxwell es pot expressar la dependència de l'entropia amb la magnetització:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial H}\right)_T = \mu_0 \cdot \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right) \cdot dH \quad (4.1.9)$$

Combinant les equacions 2.3.5, 2.3.8 i 2.3.9 s'obté la següent expressió de l'entropia

$$ds = \left(\frac{c_{pH}}{T}\right) \cdot dT + \mu_0 \cdot \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right) \cdot dH \quad (4.1.10)$$

El canvi reversible de la temperatura ( $\Delta T_{ad}$ ), que representa la quantificació del MCE en un procés adiabàtic de magnetització, s'expressa a partir de l'equació 2.3.10 i establint que  $ds=0$ :

$$MCE_{ad} = \Delta T_{ad} = -\mu_0 \cdot \int_{H_0}^{H_1} \left(\frac{T}{c_{pH}}\right) \cdot \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right)_H \cdot dH \quad (4.1.11)$$

Considerant una variació del camp magnètic en un procés isotèrmic ( $dT=0$ ), el canvi reversible de l'entropia  $\Delta s$  és igual al canvi de l'entropia magnètica  $\Delta s_m$ . Es pot expressar a partir de l'equació 2.3.10, considerant que  $dT=0$  i sabent que MCE d'un procés isotèrmic és la variació d'entropia  $\Delta s$ .

$$MCE_{isot} = \Delta s = \Delta s_m = -\mu_0 \cdot \int_{H_0}^{H_1} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T}\right) \cdot dH \quad (4.1.12)$$

A partir de les equacions 4.1.11 i 4.1.12 es poden determinar algunes situacions aplicant un increment en el camp magnètic  $\Delta H > 0$ .

### 4.3.2 Transicions de fase

La transició de fase consisteix en el canvi d'una fase a un altre, el qual provoca un canvi abrupte de les propietats d'una o més propietats físiques. Es distingeixen dos tipus de transicions de fase: magneto-estructurals o de primer ordre i transicions contínues o de segon ordre.

#### 4.3.2.1 Transicions de primer ordre

En les transicions de fase magneto-estructurals coexistent dues fases d'equilibri, provocant que la transformació no sigui instantània i que l'increment de temperatura vagi lligat al calor latent. Aquest tipus de transició mostren una discontinuïtat en el volum, la magnetització i l'entropia, cosa que provoca que  $\partial M/\partial T$  i  $\partial S/\partial T$  tinguin valor infinit en la temperatura de

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

transició. La transició martensítica que poden presentar alguns aliatges tipus Heusler és de primer ordre.

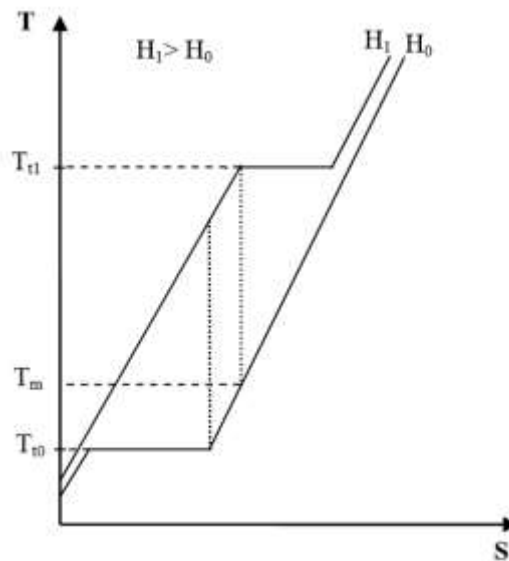


Figura 8: Diagrama esquemàtic T-S sobre la transició de primer ordre amb dos camps magnètics  $H_1$  i  $H_0$ . Imatge extreta de Romero (2013).

La imatge mostra una transició de primer ordre entre dos camps magnètics  $H_1$  i  $H_0$ , on  $H_0=0$ . Es pot veure que hi ha dues temperatures,  $T_{t0}$  i  $T_{t1}$ , que representen les temperatures de transició dels camps magnètics  $H_0$  i  $H_1$ . També hi ha  $T_m$  en el diagrama i representa la temperatura que té la mateixa entropia en el camp magnètic  $H_0$  respecta a la mínima entropia que té el camp magnètic  $H_1$  en la temperatura de transició  $T_{t1}$ . Les diferències verticals entre les dues corbes correspon a  $\Delta T_{ad}$  en un procés adiabàtic. Els valors màxims que es poden arribar a obtenir de variació de temperatura adiabàtica es troba dintre de l'interval  $T_{t0}$  i  $T_m$ .

Els materials ferromagnètics que presenten una transició de fase de primer ordre, coneguts com a materials d'efecte magnetocalòric gegant (GMCE), responen centradament en la seva temperatura de transició, però disminuint ràpidament en les proximitats d'aquesta (De Olivera i Von Ranke, 2010). Per això, aquest tipus de transició es caracteritza per uns valors  $\Delta S_m$  majors. Malgrat són considerats com els materials més prometedors, existeixen problemes deguts a la naturalesa de la transició de fase descrits per Gschneidner Jr i Pecharsky (2008). Aquest problemes poden ser:

- Histèresis tèrmica i magnètica
- Canvis de volum i estrès tèrmic entre fases existents
- Cinètica lenta de les transicions de fase de primer ordre que poden influir o limitar els rendiments dels refrigeradors.



#### 4.3.2.2 *Transicions de segon ordre*

En les transicions de fase contínues es passa de forma contínua d'una fase a l'altre sense la coexistència en equilibri de les dues. La certificació de les transformacions es veu sense la discontinuïtat en els valors del volum, magnetització i entropia, a més a més no presenten manifestacions energètiques que impliquen variacions d'entropia. No estan relacionats amb el calor latent.

La transició magnètica és el pas d'una disposició magnètica ordenada a una desordenada, i els materials que tenen una magnetització espontània, la temperatura de transició s'anomena la temperatura de Curie.

#### 4.3.3 **Característiques dels Materials per a Refrigeració Magnètica**

Tots els materials magnètics tenen un MCE en major o menor mesura, però només aquells que els permeten ser candidats potencials per a la seva utilització en refrigeració magnètica. Malauradament, el material magnètic ha de tenir altres qualitats que el permetin ser bon candidat, aquestes van ser descrites per Yu et al. (2003), entre d'altres:

- Temperatura de treball adequada al procés a realitzar.
- Temperatura de Curie pròxim a la temperatura de treball.
- Gran diferència de temperatures ( $\Delta T_{ad}$ ) en les proximitats de la transició de fase.
- Transició de segon ordre amb falta d'histerèsis tèrmica i magnètica i així poder obtenir una alta freqüència de treball i més capacitat de refrigeració.
- Baixa calor específica i alta conductivitat tèrmica, permeten grans canvis de temperatura, increment de la transferència tèrmica i augment de l'eficiència.
- Alta resistència elèctrica, amb l'objectiu d'evitar les corrents de Foucault per la ràpida variació dels camp magnètics aplicats.
- No tòxics
- Resistent a la corrosió
- Bones propietats mecàniques
- Baix cost de fabricació (viabilitat comercial)
- Baix impacte ambiental.

### 4.4 **Cicles de refrigeració magnètica**

#### 4.4.1 **Cicle Carnot**

El cicle Carnot és considerat el cicle de referència tant en els refrigeradors convencionals com en els refrigeradors magnètics. En el refrigerador magnètic ens permet estudiar les manifestacions del MCE. Igual que en el cicle de Carnot per sistemes de refrigeració convencional, el cicle conté dos processos adiabàtics i dos isotèrmics.

## Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

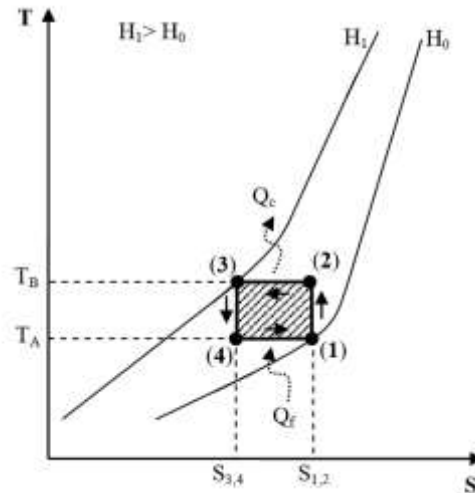


Figura 9: Diagrama T-S del cicle Carnot d'un refrigerador magnètic. Imatge extreta de Romero (2013).

El cicle comença amb una magnetització parcial de refrigerant (procés 1-2) provocant l'augment de la temperatura de  $T_A$  a  $T_B$ . A continuació, s'aplica un increment del camp magnètic de forma isotèrmica (procés 2-3) on s'allibera calor a l'exterior mentre la temperatura  $T_B$  no incrementa. Quan s'arriba al final del procés isotèrmic, comença una altre procés adiabàtic on es redueix la magnetització del camp fins aconseguir una magnetització parcial a la temperatura  $T_A$  (procés 3-4). Finalment, s'aplica una reducció isotèrmica del camp magnètic (procés 4-1) on aquest absorbeix calor de l'exterior aconseguint l'efecte refrigerador desitjat.

El COP de refrigeració sense rendiments aplicats es pot trobar fàcilment en el diagrama T-S de qualsevol cicle a partir de les diferents àrees. L'àrea interior del cicle correspon a la calor neta del procés cíclic mentre l'àrea que es troba sota la corba 4-1 és el calor absorbit pel sistema. El COP de refrigeració del cicle Carnot de refrigeració magnètica coincideix amb la mateixa fórmula que té el cicle Carnot convencional amb la particularitat que la diferència entre temperatures és coneguda com a *working temperature span*.

$$COP_{id} = \frac{\text{Àrea } S_{3,4}-4-1-S_{1,2}-S_{3,4}}{\text{Àrea } 1-2-3-4-1} = \frac{T_f}{T_c - T_f} = \frac{T_f}{\Delta T_{span}} \quad (4.2.1)$$

### 4.4.2 Cicle Brayton

El cicle Brayton de refrigeració magnètica consta de dues etapes adiabàtiques i dues etapes amb intensitat del camp magnètic aplicat constant. La transmissió del calor es produeix en les etapes on la intensitat del camp és constant, provocant un increment en la capacitat de transferència de calor entre el refrigerant i l'exterior.

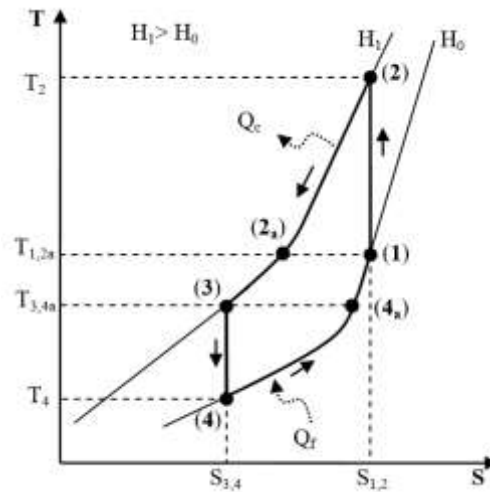


Figura 10: Diagrama T-S d'un cicle Brayton de refrigeració magnètica amb regeneració. Imatge extreta de Romero (2013).

Començant el cicle des del punt 1, hi ha una magnetització adiabàtica que permet arribar al punt 2 amb una temperatura  $T_2$  superior a la temperatura inicial  $T_1$ . Quan s'arriba al punt 2, es comença a cedir calor des del focus calent a l'exterior ( $\dot{Q}_c$ ) i disminuint la temperatura fins a  $T_{2a}$  que coincideix amb la temperatura  $T_1$ . Per tal d'aconseguir que s'arribi al punt 3, amb la temperatura  $T_3$ , s'ha d'aplicar un refredament addicional que s'aconsegueix a partir del regenerador que cedeix calor del procés  $4_a-1$ . Quan s'arriba el punt 3, comença una desmagnetització adiabàtica que permetrà arribar al punt 4 amb  $T_4$  i a continuació començar un procés d'absorbir calor en el focus fred ( $\dot{Q}_f$ ). El procés d'absorció de calor en el focus fred continua fins arribar a la temperatura  $T_{4a}$  que coincideix amb la temperatura  $T_3$ . A continuació, en el procés  $4_a-1$ , s'absorbeix calor del regenerador i es tanca el cicle.

El COP de refrigeració del cicle Brayton s'obté a partir de la fórmula general on el calor de refrigeració s'obté a camp magnètic constant, cosa que provoca que el càlcul del calor a partir de taules requereixi una molt bona comprensió de la gràfica T-S. El divisor del COP és qualsevol energia que s'utilitzi en el procés que tingui cost econòmic.

$$COP = \frac{\text{Àrea } S_{3,4}-4-4a-S_{4,a}-S_{3,4}}{W_{cost}} \quad (4.2.2)$$

#### 4.4.3 Cicle Ericsson

El cicle Ericsson és un cicle que consta de 2 processos de magnetització isotèrmica i dos processos de regeneració, la qual requereix una diferència de temperatura que garanteixi la transferència de calor.

## Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

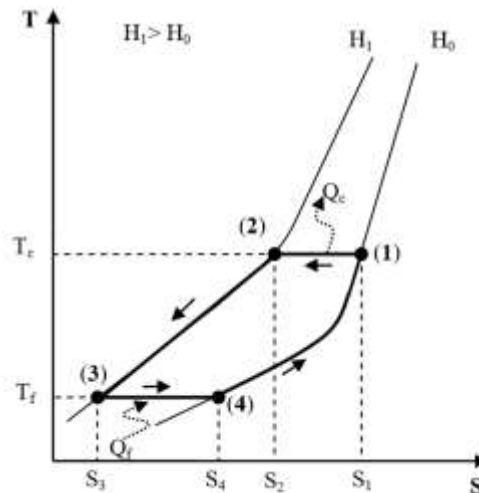


Figura 11: Diagrama T-S d'un cicle Ericsson amb regeneració. Imatge extreta de Romero (2013).

El procés 1-2 podem veure que el sistema expulsa calor a l'exterior a partir d'una magnetització isotèrmica a temperatura  $T_c$ . A continuació hi ha el procés 2-3 que consta d'un intercanvi tèrmic cedint calor mitjançant la regeneració amb el procés 4-1, aconseguint reduir la temperatura de  $T_c$  fins a  $T_f$ . Després del procés 2-3, hi ha el procés 3-4 on s'absorbeix calor mitjançant una desmagnetització isotèrmica a temperatura  $T_f$ . Finalment, hi ha el procés 4-1 on s'absorbeix el calor del procés 2-3, la temperatura puja de  $T_f$  fins a  $T_c$ , i es tanca el cicle.

El COP d'un cicle Ericsson, com la resta de casos, s'obté a partir de la fórmula general on el càlcul a partir de la gràfica T-S permet obtenir fàcilment el calor de refrigeració, ja que és una línia recta degut a un procés isotèrmic. Pel que fa al divisor del COP, aquest consisteix, com els altres casos, en l'energia necessària per tal de poder completar un cicle i que alhora tingui cost econòmic.

$$COP = \frac{\text{Àrea } s_3-3-4-s_4-s_3}{W_{cost}} \quad (4.2.3)$$

### 4.4.4 Cicles magnètics en cascada

Els cicles magnètics en cascada utilitzen múltiples cicles de refrigeració amb diferents materials que tenen diferents temperatures de Curie, així poden utilitzar cada material a la temperatura més idònia i aconseguir el MCE màxim, perquè el material ferromagnètic té l'efecte MCE màxim a la temperatura de Curie aquest disminueix cada cop més a mesura que la temperatura s'allunya de l'òptima.

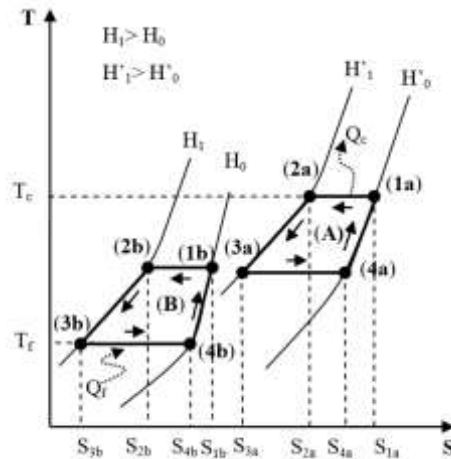


Figura 12: Diagrama T-S d'un cicle de refrigeració magnètica amb dos cicles iguals. Imatge extreta de Romero (2013).

El cicle en cascada de la Figura 2.3-8 està format per dos cicles anomenats A i B, on el cicle B absorbeix el calor mentre el cicle A deixa anar calor. Una gran avantatge d'aquest sistema en cascada de refrigeració magnètica és que no es necessita l'intercanvi de calor entre cicles ja que es pot utilitzar el mateix fluid pels dos cicles.

Per tal de poder obtenir el COP del cicle s'ha de tenir en compte que el treball realitzat és la suma de les dues àrees mentre que el calor absorbit és l'àrea que es troba sota de la recta 3b-4b. Les principals dificultats són les mateixes aplicades als cicles individuals.

$$COP = \frac{\text{Àrea } S_{3b}-3b-4b-S_{4b}-S_{3b}}{W_{cost}} \quad (4.2.4)$$

#### 4.4.5 Cicle de regenerador magnètic actiu (AMR)

El cicle AMR va ser introduït per Steyert el 1978 com un cicle on el material magnètic no només serveix per com a refrigerant sinó com a regenerador pel flux de transferència del calor. Posteriorment, 1992, Chen et al. va determinar que aquest cicle té el millor rendiment a temperatura ambient exceptuant el cicle Carnot.

El cicle AMR convencional consta d'una magnetització i una desmagnetització adiabàtica, juntament, amb dos processos amb el camp magnètic constant. A més a més, el cicle AMR inclou un fluid de transferència de calor que associa el refrigerant amb els intercanviadors de calor del focus fred i calent. El regenerador es troba submergit en el fluid de transferència de calor i mitjançant pistons o bombes es mou el fluid pel regenerador.

Degut a la naturalesa del procés, el cicle AMR no pot ser representat en un diagrama T-S, cada part del cicle executa un cicle termodinàmic individual units mitjançant el fluid de transferència de calor.

## Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

El refrigerador magnètic està format per 5 parts: un imant (1), un regenerador amb material magnetocalòric (2), intercanviadors del focus fred (3) i focus calent (4) i, finalment, un dispositiu que proporcioni el flux del fluid de transferència de calor al regenerador actiu (5).

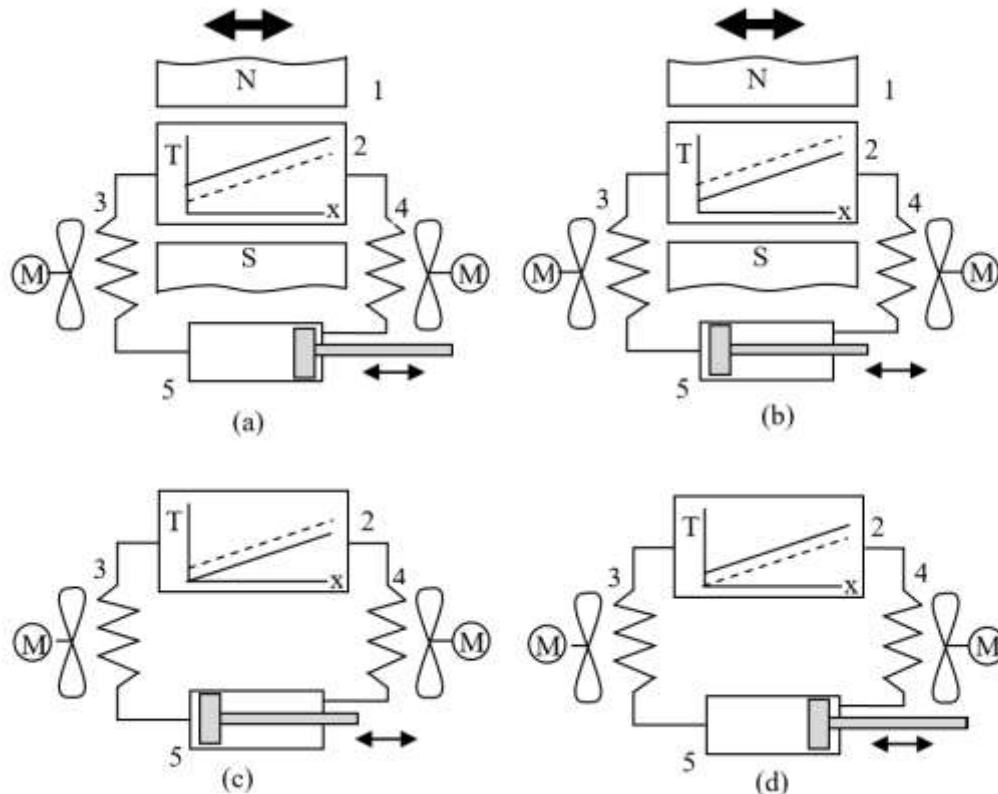


Figura 13: Il·lustració esquemàtica d'un refrigerador magnètic amb cicle AMR. Imatge extreta de Romero (2013).

El cicle AMR experimenta 4 processos, aquests són:

- Procés de magnetització adiabàtica que provoca l'augment de temperatura del material regenerador magnetocalòric, l'increment de temperatura pel material és absorbit pel fluid de transferència de calor i incrementant la temperatura d'aquest.
- Procés de refredament del regenerador a camp magnètic constant. Aquest procés es produeix a partir del canvi del fluid de transmissió de calor del regenerador amb el fluid procedent de l'intercanviador de calor del focus fred. El fluid absorbeix temperatura del regenerador i la cedeix a l'intercanviador de calor calent a una temperatura superior a la del focus calent.
- Procés de desmagnetització adiabàtica que provoca el refredament del material regenerador magnetocalòric. El material absorbeix calor del fluid de transferència mentre el fluid redueix la temperatura per sota de la temperatura del focus fred.
- Procés d'escalfament del regenerador amb el camp magnètic constant, a camp nul. A partir del procés (c), el fluid de transferència de calor que es trobava amb el

material regenerador és desplaçat a l'intercanviador del focus fred pel fluid procedent de l'intercanviador del focus calent.

El COP de refrigeració en un cicle AMR només pot ser obtingut a partir de la fórmula general, ja que la transferència de calor entre fases no és directe sinó a partir d'un fluid. En el divisor hi ha de constar la suma de tots els costos d'energia que puguin tenir cost econòmic.

$$COP = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}_{cost}} \quad (4.2.5)$$

#### 4.4.5.1 Modelització d'un AMR

Un prototip AMR requereix una anàlisi del sòlid i el fluid en el regenerador, el qual ha de tenir en compte la transmissió de calor entre les dues fases, la dinàmica del fluid, la termodinàmica i els camps magnètics. També s'ha de determinar les pèrdues irreversibles degut a la desmagnetització, la histèresis, el canvi de la direcció del fluid que venen determinades principalment pel disseny estructural de la màquina.

Actualment, hi ha una varietat important de models que permeten analitzar el comportament dels regeneradors però degut a la complexitat dels càlculs només s'analitza el que passa en el regenerador i no en tot el cicle. L'existència de la necessitat de grans càlculs provoca que s'utilitzin models AMR simplificats per tal de poder obtenir respostes ràpides i aconseguir una guia en el disseny conjunt de la màquina. Aquest models simplificats sacrifiquen nivell de detall per reduir la demanda computacional.





## **5 COMPARACIÓ REFRIGERACIÓ CONVECIONAL VS MAGNÈTICA**

### **5.1 Introducció**

La refrigeració consisteix en el procés de desplaçar la calor d'un espai a un altre, permeten que dintre de l'espai inicial hi hagi una disminució de la temperatura. En l'actualitat, el sistema de refrigeració més comú és el que utilitza l'evaporació i la condensació a partir de la variació de pressió de treball com a sistema per absorbir i desprendre calor. Aquest sistema té molts defectes, un dels principals és el material refrigerant que s'utilitza que normalment és molt contaminant, malgrat que s'han aprovat lleis per canviar-ho, com la normativa F-Gas.

Els sistemes de refrigeració convencionals tenen un problema que els impedeix poder assolir el màxim rendiment possible, a causa de la naturalesa de les màquines que es requereixen en el procés d'increment de pressió isentròpica, juntament amb els diferents problemes de sobreescalfament, subrefredament i el rendiment de les màquines, provoca que el rendiment del sistema no sigui gaire elevat i provoqui consums importants d'energia i la contaminació corresponent. Per aquests i altres motius cada cop s'ha estat buscant altres sistemes substitutius que permetin obtenir un sistema que no utilitzi materials refrigerants contaminants i es puguin aconseguir rendiments elevats de conversió entre energia consumida i calor de refrigeració de la màquina. Un dels principals candidats que poden permetre aconseguir aquests objectius és la refrigeració magnètica.

### **5.2 Anàlisi inicial**

Els sistemes de refrigeració magnètica han estat estudiats amb molts dels seus aspectes i s'han aconseguit diferents resultats que permeten obtenir una idea inicial de la capacitat d'un sistema.

Per un costat, el mètode de mesura més simple que existeix per comparar dos materials és a partir del RC i ER. Aquestes mesures ens permeten saber quina és la capacitat màxima que té un material en un cicle, aquest tipus de comparació és útil quan es compara amb elements similars, o bé per veure quina és la capacitat màxima que té un material en un cicle. Un dels inconvenients d'aquests tipus de mesura és que el seu resultat va en funció de la massa de cada producte però no té en compte l'energia que requereix per completar un cicle corresponent amb aquest material. Per l'altre, la comparació més comuna és utilitzant el COP. Aquest valor consisteix a fer el quocient entre la calor de refrigeració del cicle i el treball que s'aplica al sistema per tal de poder fer el cicle, aquest quocient és equivalent a la potència refrigeradora del cicle dividit entre la potència que requereix aquest, i alhora soluciona el problema principal que té la mesura del RC i ER. Un altre valor utilitzat és el % COP<sub>id</sub> que

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

representa el COP obtingut dividit pel COP de Carnot,  $COP_{id}$ , ja que mostra quin percentatge té el cicle respecte el cicle ideal.

Els cicles de refrigeració magnètica tenen una gran dependència dels materials magnetocalòrics utilitzats. Aquesta situació provoca que els valors del  $RC_{eff}$  i les temperatures de treball del material influencien la presa de decisions per part dels investigadors a l'hora de triar el material en un prototip, per això s'ha fet la taula 2 amb diferents materials magnetocalòrics i les seves temperatures dels diferents focus de calor juntament amb la seva capacitat refrigeradora eficaç,  $RC_{eff}$ , a partir de la figura 8 de l'estudi de Zhang et al. (2018). Els valors de RC de la taula 2 de l'Annex A són superiors als aconseguits calcular en els diferents prototips. Una altra característica important a l'hora de dissenyar el prototip per part dels investigadors és freqüència de treball, ja que en diferents estudis com Utaka et al. (2019) i Qian et al. (2018) mostra que l'increment d'aquesta provoca una caiguda important del valor del COP. També s'ha de tenir molt en compte els diferents tipus de pèrdues del sistema, ja que l'estudi de Maiorino et al. (2019) ha mostrat com una reducció d'aquestes pèrdues permet incrementar el COP d'un prototip de 2,5 fins a 3,3 a partir de la reducció dels corrents de Foucault i les càrregues tèrmiques.

Els cicles convencionals tenen una gran dependència del refrigerant que s'utilitza en el cicle, perquè és aquest qui determina l'ER i el treball necessari per completar el procés. A partir d'aquesta situació, un dels principals elements per poder la comparació, és la tria d'un refrigerant homologat per la Unió Europea. La normativa comunament coneguda com a F-Gas és la que determina la utilització dels diferents refrigerants, el seu nom tècnic és el Reglament UE N° 517/2014 i és on es determina el valor d'un conjunt de substàncies bàsiques i el mètode de mesura per a compostos amb els PCA (*Potencial de Calentamiento Atmosférico*) corresponents, juntament amb el seu percentatge màxim legal en funció dels PCA i l'any de fabricació. En el cas d'aquest estudi, s'utilitzarà el refrigerant R717 que té com a compost únic l'amoníac,  $NH_3$ , i amb un valor de PCA igual a 0, cosa que provoca que sigui idoni per a la comparació.

### **5.3 La comparació entre prototips reals i cicles convencionals**

La comparació entre els dos tipus de cicle de refrigeració consistirà en la presentació d'un cicle de refrigeració magnètica real amb dades obtingudes de diferents publicacions del tema i el cicle convencional estàndard corresponent amb les mateixes temperatures dels focus, tan fred com calent. Amb l'objectiu de simplificar els càlculs dels cicles convencionals, aquests no tindran en compte el sobreescalfament a l'aspiració del compressor, el subrefredament a la sortida del condensador, el rendiment del compressor ni les pèrdues de càrrega del fluid entre altres, consistirà amb el cicle amb menys cost d'energia possible.

D'una banda, hi ha les anàlisis dels diferents cicles de refrigeradors magnètics on s'analitzarà els prototips de diferents publicacions. El primer prototip ha estat dissenyat per *Cooltech Applications*, ha estat estudiat per Chaudron et al (2018). Aquest prototip és una aproximació al disseny d'un refrigerador magnètic industrial amb una potència frigorífica aproximada de 15 kw que utilitza un camp magnètic uniforme de 0,49 T, una freqüència d'1,12 Hz i un aliatge no especificat amb base Gd. Totes les mesures de la publicació han estat obtingudes a partir d'un cicle de refrigeració que contenia 2 dels 32 regeneradors que serien utilitzats en aquesta màquina i 5,5 kg d'aliatge amb base Gd en aquests dos refrigeradors. L'estudi ha presentat els dos millors resultats obtinguts en les proves, on el  $\dot{Q}_f$  té els valors de 768 w amb una  $T_H=21,25$  °C en el resultat que anomenat en aquest estudi 1-A, i 900 w amb una  $T_H=17,25$  °C, en el resultat 1-B, i un  $\Delta T_{span}$  19,67 i 16,33 K, respectivament. Aquests valors han permès obtenir un COP real de 8,4 i 9,7 provocant que el seu % COP<sub>id</sub> sigui del 60,02% i 57,91%, respectivament. Una altra dada important a analitzar és RC del sistema, en aquest cas és de 124,68 i 146,10 J/kg, aquests valors poden ser fàcilment la meitat dels valors màxims del RC<sub>eff</sub> de l'aliatge corresponent, cosa que ens mostra que hi ha ineficiències i pèrdues importants.



Figura 14: Exterior del prototip de Chaudron et al. (2018). Imatge extreta de Chaudron et al. (2018).

El segon prototip anomenat FAME Cooler i estudiat per Huang et al. (2019) ha estat dissenyat per utilitzar 1,18 kg d'esferes de Gd, el camp magnètic mitjà pot variar entre 0 i 0,875 T i la freqüència pot variar des de 0 a 3 Hz. Els resultats obtinguts pels experiments tenen valors inferiors als aconseguits per la màquina de *Cooltech Applications* en tots els punts analitzats. Els resultats corresponents del COP han estat presos amb una  $T_H=22$  °C i tenen el valor d'1,45, 1,85 i 1,59 per una  $\Delta T_{span}$  de 7,8, 9,6 i 11,6 K, respectivament. Quan s'analitza el poder calorífic de cada un dels tres grups podem veure que hi ha un increment de la potència

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

refrigeradora que incrementa de 40,2 w en el resultat 2-A fins a 162,4 w en el resultat 2-C. Paral·lelament, la mateixa situació passa amb el valor que agafa RC, on el valor del resultat de 2-A és de 68,14 J/kg, 2-B és de 72,32 J/kg i, finalment, 2-C té un valor de 80,96 J/kg. Una característica important per veure l'eficiència del sistema en referència al cicle de Carnot, però en aquest prototip els valors que corresponent al % COP<sub>id</sub> tenen un valor molt reduït que són de 3,94, 6,22 i 6,51% en els resultats de 2-A a 2-C.

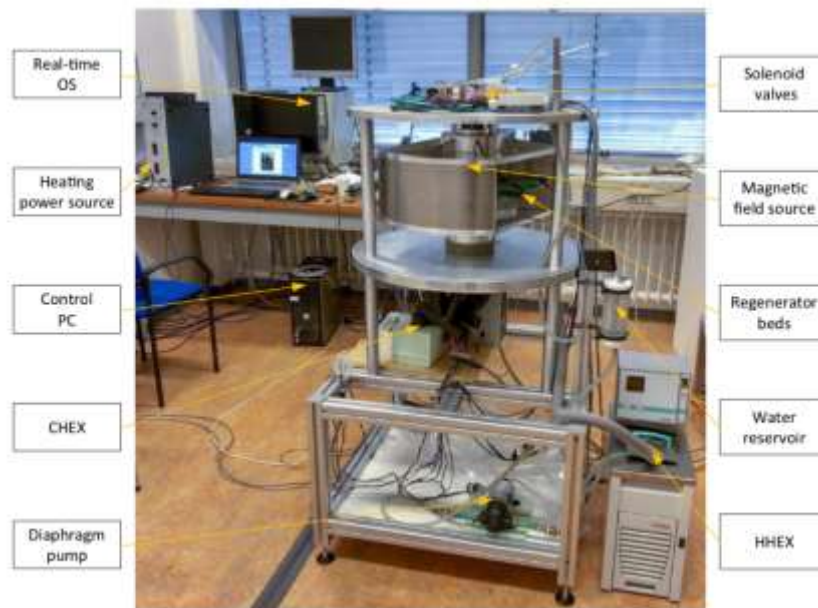


Figura 15: Prototip FAME Cooler. Imatge extreta de Huang et al. (2019)

El tercer prototip patentat per Eriksen et al. (2015), ha estat estudiat principalment per Eriksen amb altres col·laboradors. En la tesi doctoral d'Eriksen, una part dels diferents capítols d'aquesta consisteixen en articles que tracten sobre el prototip. En aquest estudi s'ha agafat les dades obtingudes del capítol 6 de la tesi, on es troben el conjunt de dades útils per la comparació. Les dades utilitzades per la comparació tenen fixat la potència refrigeradora  $\dot{Q}_f$  amb un valor de 81,5 w, la massa del refrigerant és d'1,7 kg d'esferes de Gd i aliatges Gd<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>. El prototip aconsegueix un COP de 3,6 i una  $\Delta T_{span}$  de 15,5 K amb una freqüència 0,61 Hz i una temperatura de focus calent de quasi 49 °C. Després de l'anàlisi del % del COP de Carnot, l'autor proposa un conjunt de possibles millores que permetrien millor el COP de la màquina fins al 57% COP<sub>id</sub> provocant la màquina pugui aconseguir una eficiència pròxima a la màquina creada per *Cooltech Applications* i estudiada per Chaudron et al. (2018).

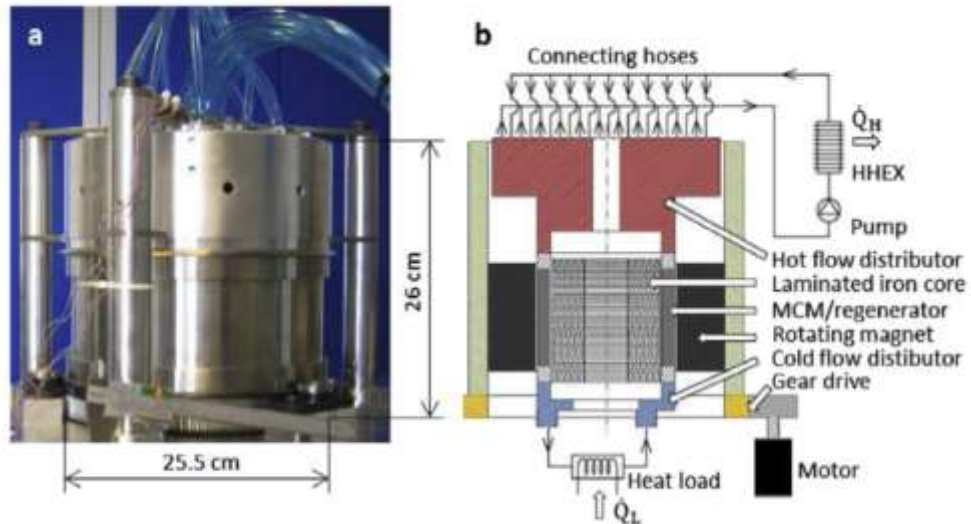


Figura 16: a) Exterior del prototip d'Eriksen et al.(2015). b) Esquema de la secció transversal del prototip. Imatge extreta de Eriksen (2016).

El quart prototip ha estat estudiat per Trevizoli et al. (2016). L'estudi sobre el prototip té dues parts, però en aquest estudi només s'han agafat dades de la primera part. Les dades utilitzades han estat extretes de les diferents gràfiques que hi ha en l'article per un factor d'utilització igual a 0,38 i una temperatura del focus calent de 300 K. S'han seleccionat quatre experiments amb unes  $\Delta T_{span}$  de 15 i 20 K i unes freqüències de 0,5 i 1 Hz. Aquesta situació permet comparar un mateix cicle de refrigeració magnètica en dues freqüències diferents. Els resultats mostren que el COP i % COP<sub>id</sub> tenen uns valors superiors amb la freqüència de 0,5 Hz, però el COP més elevat és d'1,92 i representa un 10,12 % del COP de Carnot, cosa que mostra una ineficiència bastant elevada.

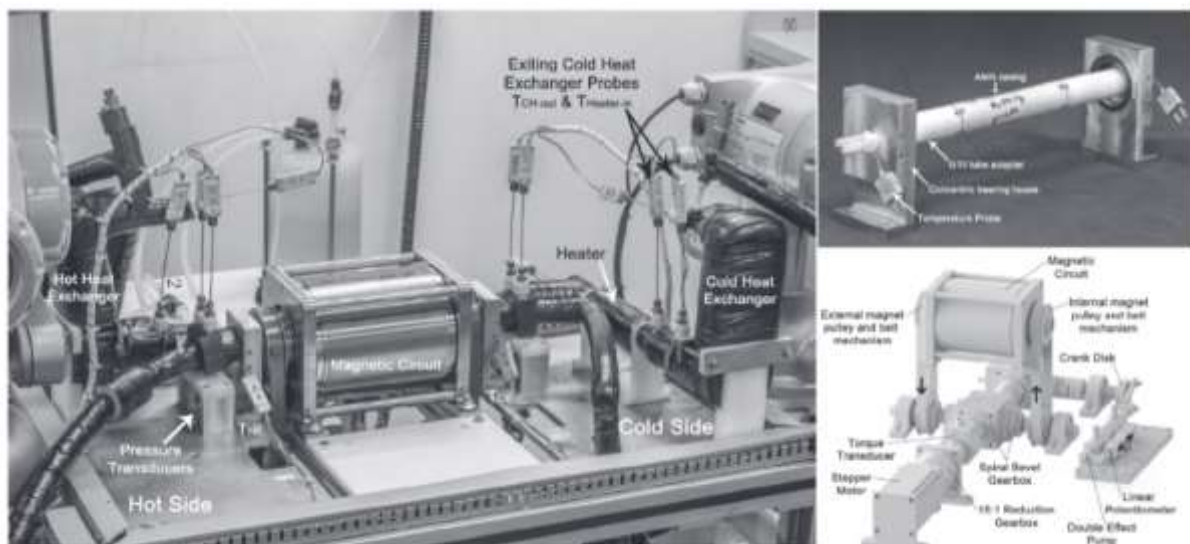


Figura 17: Imatge del prototip de Trevizoli et al (2016). Imatges extreta de Trevizoli et al (2016).

El cinquè prototip estudiat per Engelbrecht et al. (2012) aconseguix dos COP diferents, un d'1,8 amb una potència refrigeradora de 400 w i una  $\Delta T_{span}$  de 8,9, i l'altre de 0,8 amb una

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

potència 200 w i una  $T_H$  pròxima als 24,2 °C i una freqüència d'1 Hz en ambdós casos. Els valors del % del  $COP_{id}$  són del 5,56% i de 4,37%, similars als obtinguts en el prototip de Huang et al. (2019). El valor del RC és de 142,86 i 71,43 J/kg, on el primer valor és molt similar a l'obtingut pel prototip de Chaudron et al. (2018).

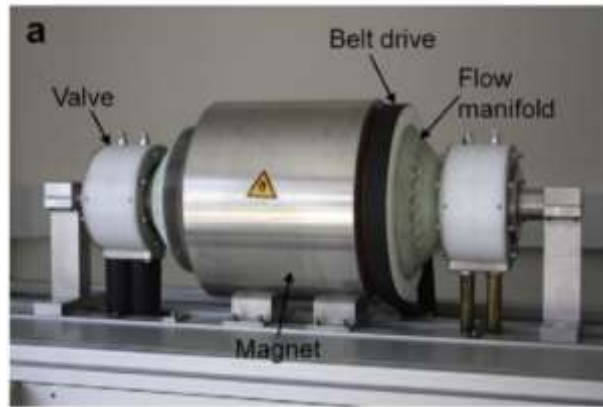


Figura 18: Prototip d'Engelbrecht et al. (2012). Imatge extreta d'Engelbrecht et al. (2012).

De l'altra, els cicles convencionals estàndards equivalents amb les temperatures dels focus iguals que els casos reals comentats anteriorment mostren uns resultats amb valors superiors en tots els casos i principalment amb un % del COP de Carnot superior al 90% en tots ells. Convé ressaltar que totes les possibles pèrdues que disminuirien el valor final del COP han estat omeses en el disseny dels cicles convencionals estàndards equivalents.

## 5.4 Conclusions

Els resultats d'obtinguts de la comparació entre els cicles convencionals i els cicles de refrigeració magnètica mostren una clara necessitat de fer més recerca per tal d'aconseguir millors rendiments als analitzats, però es pot veure en l'estudi de Chaudron et al. (2018) on s'aconsegueix un %  $COP_{id}$  amb valors pròxims al 60% en un prototip pròxim a un model industrial, cosa que mostra la capacitat del cicle de refrigeració magnètica pot millorar encara més la seva eficiència i així poder aconseguir dissenys de màquines amb un COP similar als que es troben en l'actualitat en el mercat.

Un dels principals reptes que tenen a l'hora de dissenyar els prototips són el conjunt de paràmetres que determinen els valors del treball necessari i de la calor de refrigeració produït. Aquests paràmetres són principalment el material magnetocalòric, la freqüència de treball i les temperatures de treball, també és necessari comentar la importància dels diferents tipus de pèrdues degudes als corrents de Foucault entre altres que afecten en important mesura al COP resultant dels diferents prototips, com explica Eriksen (2016) juntament amb un conjunt de possibles millores. També és important mencionar el conjunt de característiques que fan referència a la capacitat de magnetització del material magnetocalòric, ja que els seus

paràmetres determinen la capacitat de magnetitzar-se i desmagnetitzar-se provocant que afecti la freqüència de treball.

En referència al material magnetocalòric, hi ha una gran varietat de possibles materials que presenten les característiques necessàries i estudiats, alguns han estat recollits per Zhang et al. (2018) on es pot veure diferents materials magnetocalòrics estudiats amb les temperatures de treball amb camp magnètics aplicats de 5 T. En la taula es pot comprovar com alguns dels diferents aliatges amb base de Gd tenen un interval de treball amb temperatures que fàcilment poden treballar amb temperatures pròximes a l'ambient. Una altra característica important del material magnetocalòric és la temperatura de Curie, aquesta es troba molt relacionada amb l'interval de treball, ja que és un gran mètode per saber si un material és òptim a l'hora de treballar en un interval determinat, a causa que els materials tenen una temperatura de Curie diferent permet adaptar millor el material en funció del cicle que es vol treballar.

Per concloure, actualment les màquines de refrigeració magnètiques no poden competir amb els refrigeradors convencionals però es pot veure una tendència amb els diferents prototips presentats on s'ha aconseguit obtenir uns resultats molt bons permeten noves millores que podrien aparèixer pròximament.





## 6 DISSENY D'UN PROTOTIP CONCEPTUAL

### 6.1 Introducció

Un dels principals objectius del treball consisteix en el disseny d'un prototip i calcular el seu paràmetre més important, el COP. Amb aquest objectiu, s'ha dibuixat un model molt similar al patentat per Eriksen et al. (2015) combinat amb característiques del primer prototip de la DTU (Eriksen, 2016), s'utilitzarà Gd com a material magnetocalòric. Aquest prototip conceptual esquematitzarà una secció transversal de la màquina, a partir de la qual s'obtidran els valors dels diferents càlculs, juntament amb un esquema del sistema de refrigeració.

El disseny de l'AMR consisteix en un rotor i un estator amb dues variacions creades a partir de la variació del diàmetre exterior, un de 240 mm, opció A, i l'altre de 200 mm, opció B. Aquesta situació ha portat a dos camps magnètics diferents i a dues solucions finals diferents. Els càlculs han estat realitzats a partir del programa d'elements finits FEMM, *Finite Element Method Magnetics*.

El procés de selecció del prototip va començar quan buscaven dades per fer la comparació entre els prototips actuals utilitzats en recerca, on després d'analitzar un conjunt important de dissenys i veure diferents esquemes dels prototips dels quals dos em van atreure molt l'atenció, Maiorino et al. (2019) i Eriksen et al. (2015). El disseny d'Eriksen et al. (2015) ha estat triat a causa de la simplicitat del disseny i del seu futur anàlisi amb el programa FEMM permeten obtenir-ne futurs valors de càlcul més fàcilment.

### 6.2 El camp magnètic

En referència al camp magnètic dels dos dissenys, aquests estan creats a partir de diferents imants permanents N50 en diferents angles. El rotor està format per dotze imants permanents en sis direccions diferents que corresponent a  $50^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $160^\circ$ ,  $-50^\circ$ ,  $-105^\circ$  i  $-160^\circ$ .

D'una banda, els valors màxims que s'ha aconseguit en el disseny de 240 mm dintre de la zona amb material magnetocalòric és pròxim a 1,5 T mentre el més petit és 0,8 T, però+ els valors més comuns tenen un valor superior a 1,19 T, en gairebé tota l'àrea d'acció, tal com es pot veure a la figura 14. Els resultats ens permeten assimilar el valor mitjà a 1,25 T simplificant els càlculs posteriors, ja que és el valor més pròxim a 1,19 T que té una taula amb resultats que fan referència a  $\Delta S_m/T$  i permeten així calcular la potència refrigeradora.

A l'annex B, hi ha els dibuixos amb el programa FEMM dels prototips amb els identificadors de materials corresponents que permet saber els diferents materials que s'ha utilitzat per fer la simulació.

## Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

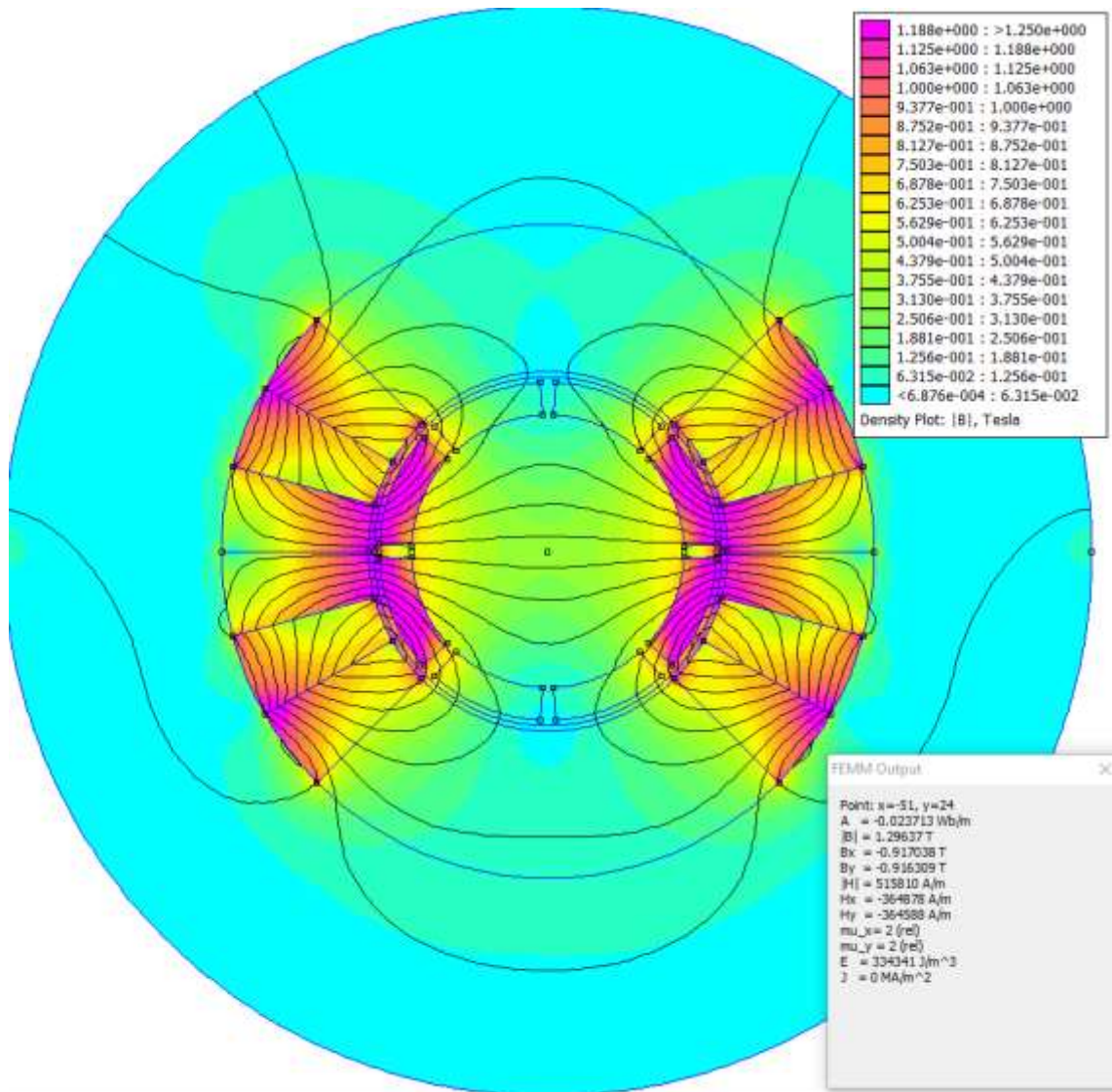


Figura 19: Camp magnètic del prototip A. Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.

D'altra banda, els valors màxim que s'ha aconseguit en el disseny de 200 mm és d'1,25 T mentre el més petit és de 0,6 T. La majoria de l'àrea té valors superiors a 1 T i a causa dels mateixos motius de simplificació esmentats anteriorment s'agafarà 1 T com a valor mitjà i del qual es faran els càlculs corresponents posteriorment.

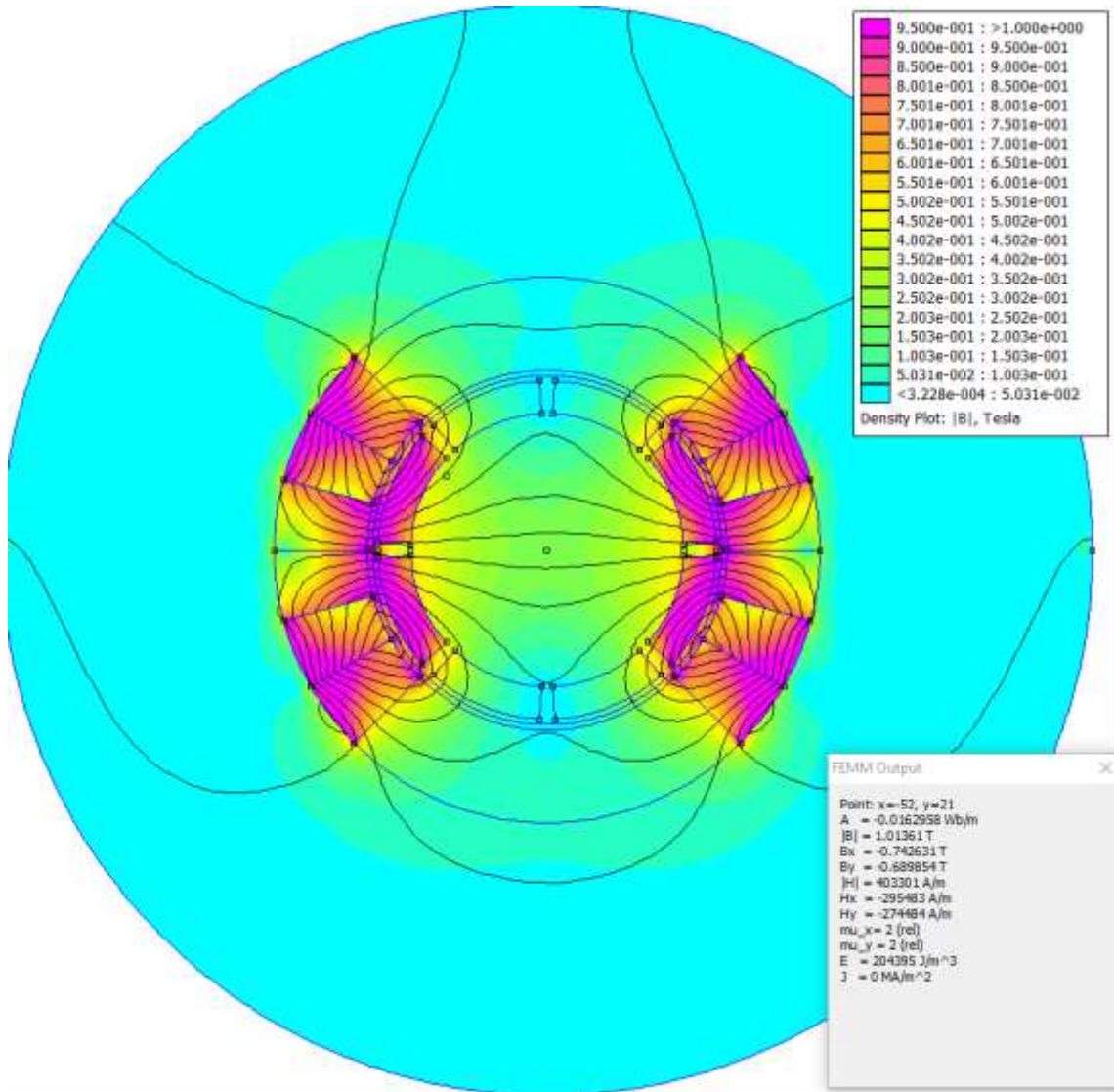


Figura 20 :Camp magnètic del prototip B. Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.

### 6.3 El consum de potència del prototip

Un dels aspectes importants a l'hora de calcular el COP d'una màquina de refrigeració és trobar el valor de les pèrdues que representen les diferents parts del prototip, en aquest cas són el rotor i el sistema de fluid.

$$P_{total} = P_m + P_b \quad (6.3.1)$$

#### 6.3.1 La potència del motor

El rotor és una peça clau del disseny del refrigerador magnètic, ja que sense la variació de camp magnètic que provoca el gir dels imants permanents no hi hauria variació d'entropia i l'efecte magnetocalòric no es produiria. Aquesta situació provoca que sigui necessari saber el seu consum, ja que aquest valor influirà directament amb el COP del prototip.

## Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

En el disseny presentat, el rotor està format per alumini 1100 i imants N50 en volums iguals en ambdós casos. Aquesta situació permet fàcilment trobar la massa que gira i posteriorment la potència necessària per aconseguir-ho. Els resultats corresponents es troben a l'Annex C i ens han permès veure com ha variat la potència requerida per cada un dels models plantejats. A més a més, s'ha vist que el consum de la potència del motor és la variable que contribueix més al consum total de potència per part del prototip i la seva reducció permet un increment important del COP.

### 6.3.2 La potència de la bomba

El bombeig del refrigerant requereix una potència hidràulica que permeti un desplaçar la calor del material magnetocalòric als corresponents focus de calor i així poder obtenir una potència de refrigeració.

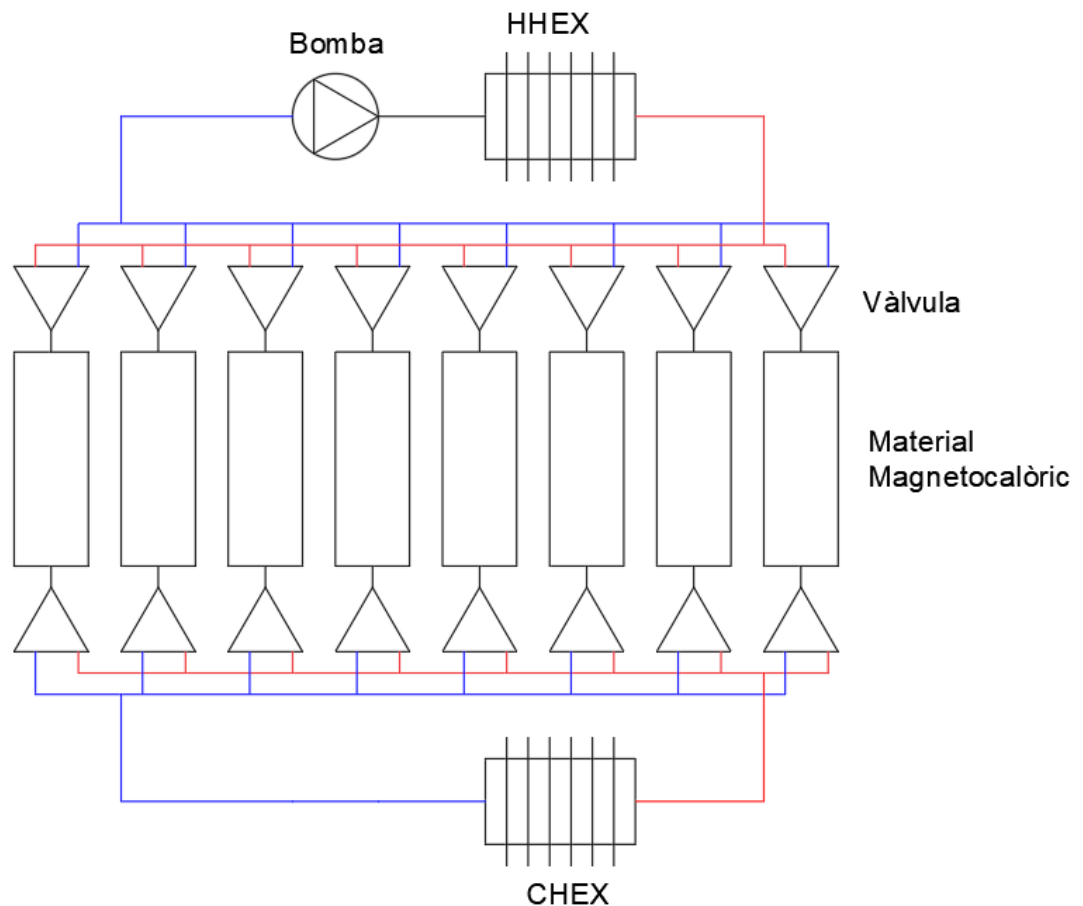


Figura 21: Esquema del sistema de flux d'aigua. Elaboració pròpia

Aquest apartat constarà d'un esquema del sistema de flux de l'aigua necessària per a la refrigeració juntament amb els càlculs del circuit hidràulic, a l'hora de fer els diferents càlculs es considerarà que cada circuit és independent dels altres exceptuant el tram de la bomba i les

pèrdues de càrrega del circuit més les vàlvules se simplificaran amb un valor de pèrdua de càrrega de 0,5 mca, el tram que conté el material magnetocalòric serà tractat com un filtre i el seu càlcul no està inclòs en el valor donat anteriorment. Els diferents càlculs corresponents es troben a l'Annex D.

## 6.4 El calor de refrigeració

La capacitat de refrigeració d'un material és dels valors més influents a l'hora de seleccionar un material magnetocalòric per un prototip, ja que a partir d'aquest valor es pot arribar a obtenir fàcilment la potència de refrigeració. El valor de RC que s'utilitza en els càlculs ha estat obtingut a partir de la integració dels diferents valors de la figura 22, els quals ens permeten obtenir una funció polinòmica a partir dels valors dintre de l'interval de 270 a 300 K i integrant aquesta funció entre dues temperatures ens permet obtenir RC corresponent. A partir d'aquest resultat, Es pot obtenir la potència refrigeradora multiplicant RC per la freqüència de la màquina que és 0,5 Hz. Els diferents càlculs i les gràfiques de regressió corresponents es troben a l'Annex E.

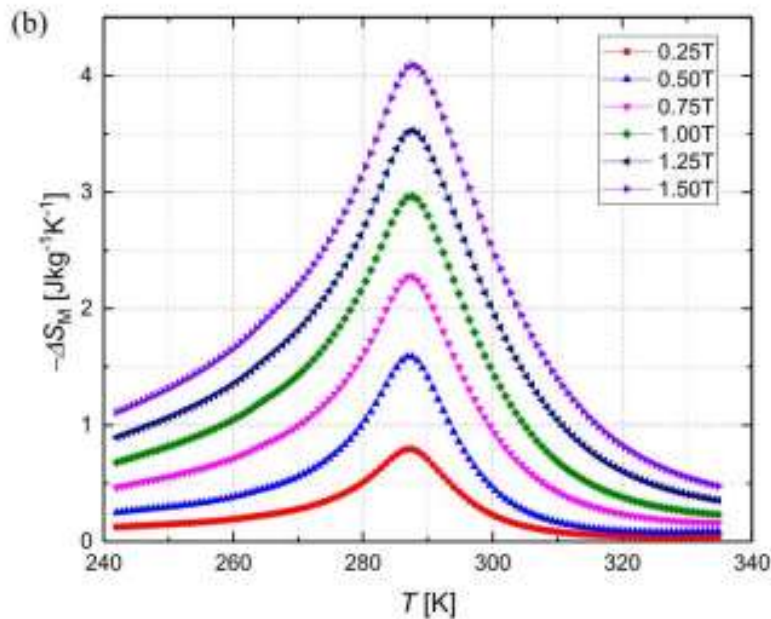
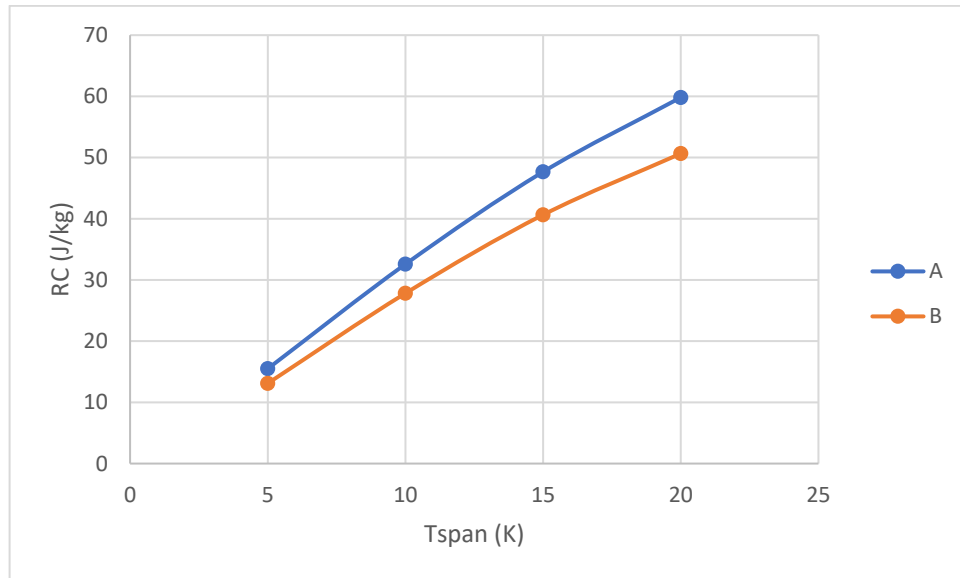


Figura 22: Variació d'entropia del Gd. Extreta de Huang et al. (2019)

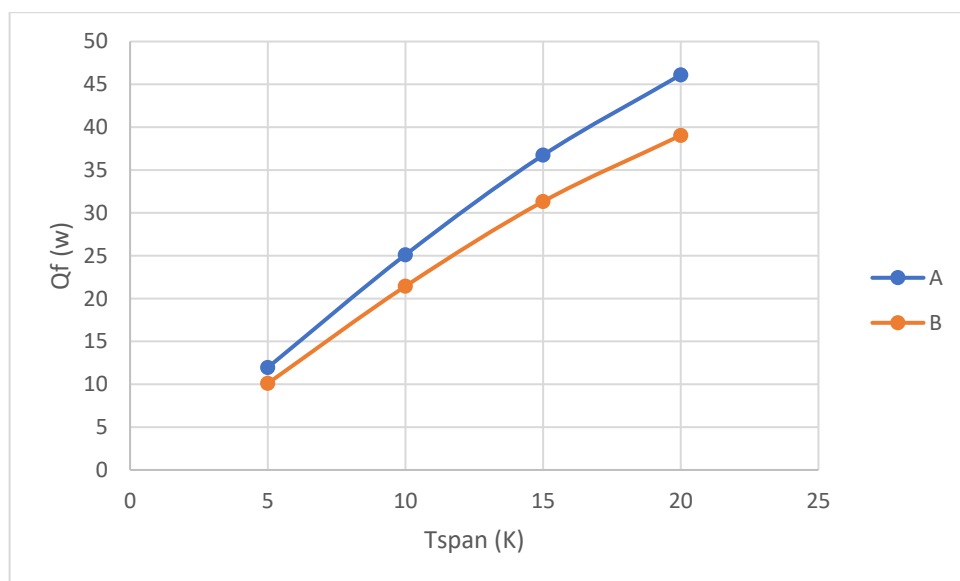
Després de trobar les dues funcions corresponents s'han integrat les dues funcions considerant que el focus calent es troba a 295 K i així obtenir diferents dues corbes diferents, els resultats del RC ens permetran calcular diferents  $\dot{Q}_f$  en funció del  $T_{span}$  que s'obtingui i posteriorment trobar el COP del prototip.

## Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional



Gràfica 1: RC en funció  $T_{span}$ . Elaboració pròpia.

Els dos prototips tenen una mateixa quantitat de material magnetocalòric, cosa que permet obtenir fàcilment  $\dot{Q}_f$ . La massa del Gd és d'1,5417 kg considerant una porositat del 35%.



Gràfica 2: Potència de refrigeració en funció de  $T_{span}$ . Elaboració pròpia.

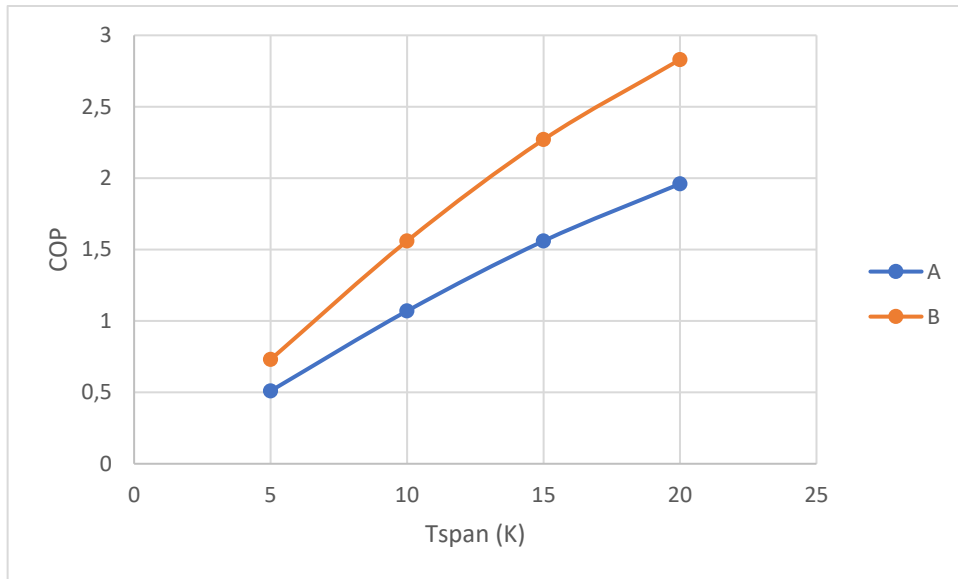
### 6.5 El COP de refrigeració del prototip

El COP correspon al paràmetre més important a l'hora de saber l'eficàcia de la màquina. El seu valor permet fàcilment una comparació entre màquines diferents però amb la mateixa funció i també orienta al comprador a l'hora d'instal·lar la màquina perquè el seu valor mostra el rendiment de la màquina.

$$COP_{prototip} = \frac{\dot{Q}_f}{P_b + P_m} \quad (6.5.1)$$



L'obtenció del COP en funció del  $T_{span}$  permet veure com els dos prototips tenen dues tendències diferents d'increment d'aquest. Per tal d'obtenir els diferents valors del COP han estat considerants que les pèrdues són constants en el canvi de variació de temperatura.



Gràfica 3: COP dels dos prototips en funció de  $T_{span}$  amb la  $T_H=295K$ . Elaboració pròpia.

## 6.6 Anàlisis dels camps magnètics dels materials del grup de recerca

La recerca produïda en la Universitat de Girona ha produït un conjunt d'aliatges Heusler que han estat utilitzats en el lloc Gd per obtenir els diferents camps magnètics que correspondrien a aquests materials. Els resultats obtinguts han estat obtinguts mitjançant l'opció A del prototip, que correspon al disseny amb un diàmetre exterior de 240 mm, i les seves imatges es troben a l'Annex B

Aliatge	Magnetització de saturació (emu/g)	Coercitivitat (Oe)	Permeabilitat magnètica inicial
$Mn_{50}Ni_{40}Sn_{10}$	69	5,2	4
$Mn_{50}Ni_{42,5}Sn_{7,5}$	44	5,8	4
$Mn_{50}Ni_{45}Sn_5$	58	6,0	4,5
$Ni_{48}Mn_{36}Sn_{14}Cu_2$	37	194	5,8
$Ni_{47}Mn_{36}Sn_{14}Ti$	29	175	6,1
$Ni_{49}Mn_{36}Sn_{14}Cu_2$	41	254	6,3

Taula 1: Resultats de la recerca de membres de la UdG. Els tres primer resultats ha estat extrets de Coll, R., (2018) i els altres tres són resultats preliminars dels treballs predoctorals de Wederni, A.

## Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

D'una banda hi ha els aliatges obtinguts de Coll, R. (2018) on es pot veure en els resultats del programa d'elements finits que les figures 19 i 20 es veu que el camp magnètic resultant és idèntic pel que fa als colors de les diferents superfícies i els valors de l'escala d'aquesta. La figura 21 mostra un camp magnètic molt similar a l'obtingut per les figures 19 i 20 però amb una escala amb intervals més gran provocant que en els valors finals en la mateixa zona tinguin el mateix color però uns valors absoluts de camp magnètic superiors. Aquesta situació pot estar donada pel valor de la permeabilitat dels aliatges que en els dos primers casos és de 4 i en el tercer cas és de 4,5.

D'altra banda, hi ha els aliatges dels resultats preliminars de Wederni, A. on es pot veure que els resultats obtinguts tenen una forma similar als obtinguts amb els aliatges de Coll, R., també es pot veure que l'escala generada automàticament incrementa directament amb l'increment del valor de la permeabilitat relativa cosa que provoca que aquest paràmetre tingui una influència molt elevada a l'hora de seleccionar quin possible material seria utilitzat en una possible màquina, ja que aquest en el cas que s'ha doblat el valor d'aquest permetre, gadolini té una permeabilitat relativa de 2 mentre els aliatges  $Mn_{50}Ni_{42,5}Sn_{7,5}$  i  $Mn_{50}Ni_{40}Sn_{10}$  tenen permeabilitat 4, els valors màxims aconseguits han incrementat d'1,4 T a valors superiors a 1,9 T, permeten un increment general considerable que pot influenciar en alguns casos on les corbes del canvi d'entropia siguin molt similars i l'increment del camp magnètic sigui significatiu.

Per concloure, els resultats dels diferents aliatges Heusler han estat molt similars on els aliatges  $Mn_{50}Ni_{50-x}Sn_x$ , s'ha obtingut uns resultats majoritaris de la superfície del material magnetocalòric d'1,85 T i els més baixos són pròxims a 0,8 T mentre els altres tres aliatges han obtingut valors superiors als 2 T a la majoria de la superfície i els valors més baixos es troben a les proximitats d'1 T.

## 6.7 Conclusions

Els resultats obtinguts pels dissenys de les dues màquines han mostrat uns resultats esperats acceptables. Aquests resultats tenen un increment de tots els paràmetres com RC,  $\dot{Q}_f$  i el COP a mesura que incrementa el  $T_{span}$ , ja que es considera que els diferents valors de les pèrdues es mantenen constants en tots els moments.

Els dissenys proposats permeten diferents millores com la utilització de diferents aliatges com a material magnetocalòric i així poder aconseguir un RC per cycle superior o bé el canvi del punt d'aplicació del moment angular, ja que si s'apropa al centre de rotació, podria reduir el consum de potència del motor i en el disseny actual aquest es troba a l'extrem més allunyat del centre.



Els resultats obtinguts del camp magnètic ens han permès fàcilment obtenir una aproximació a uns resultats posteriors, concretament, en el càlcul de RC perquè la variació d'entropia del qual depèn aquest valor es troba directament relacionat amb el valor del camp magnètic que s'aplica.

El prototip conceptual amb imants permanents dissenyat en aquest estudi té una capacitat de refrigeració molt petita en comparació als models que proposen en la bibliografia i han estat analitzats en aquest mateix estudi en el capítol 5. Aquesta situació mostra la viabilitat d'emprar altres aliatges com a mètode per aconseguir millorar el rendiment de la màquina adaptant la  $T_c$  en cada moment per aconseguir que es trobi en les proximitats d'aquesta i així obtenir la variació d'entropia màxima i com a conseqüència un increment de la potència de refrigeració.

Finalment, els aliatges obtinguts de la recerca han mostrat un comportament del camp magnètic superior a l'obtingut del Gd, permetent un increment important d'aquest, per això s'ha de buscar els diferents valors d'entropia en funció dels camps magnètics dels aliatges per poder obtenir una precisió més gran per decidir, ja que aquest valor té molta influència a l'hora de veure si els aliatges analitzats poden ser útils pel disseny de màquines de refrigeració magnètiques.



## 7 RESUM DEL PRESSUPOST

El total del pressupost per dur a terme aquest estudi és el següent:

**TOTAL: 9.099,20 €**



## 8 CONCLUSIONS

L'estudi realitzat té marcats tres objectius molt clars: una comparació entre els cicles de refrigeració convencional i els de refrigeració magnètica, una avaluació del potencial energètic màxim dels cicles de refrigeració magnètica i un disseny conceptual.

La comparació entre els cicles de refrigeració convencional i els cicles refrigeració magnètica han mostrat dues situacions molt marcades on el primer és un sistema estàndard arreu del planeta amb unes limitacions d'eficiència a causa de les limitacions del procés que impedeixen la possibilitat d'un cicle de Carnot, mentre els prototips de refrigeració magnètica mostren una situació completament diferent on alguns resultats comencen a mostrar una gran millora que permet tenir esperances en el seu desenvolupament juntament amb la capacitat d'arribar a obtenir un procés termodinàmic ideal teòricament.

L'avaluació del potencial màxim de refrigeració ha estat realitzat a partir del RC de diferents materials on s'ha vist la capacitat energètica màxima de diferents materials amb l'aplicació de camps magnètics de 5 T que permet fàcilment veure la potència de refrigeració d'un procés a partir d'una freqüència de treball del sistema i la massa del material magnetocalòric. També es pot comprovar la viabilitat del Gd i aliatges Heusler en el prototip conceptual dissenyat on es veu el comportament dels seus camps magnètics aplicat en prototip real i en el cas de Gd també els resultats finals.

Finalment, hi ha el prototip conceptual que ha estat dissenyat a partir de la patent Eriksen (2016) que ha donat uns resultats finals prou satisfactoris, juntament amb els resultats dels camps magnètics dels materials de recerca de la UdG que mostren la importància de la permeabilitat magnètica relativa dels materials magnetocalòrics juntament amb les corbes d'entropia magnètica d'un material en funció de la temperatura i finalment la seva temperatura de Curie.



## 9 BIBLIOGRAFIA

Bachaga, T., Zhang, J., Khitouni, M., Sunol, J.J. (2019). NiMn-based Heusler magnetic shape memory alloys: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-12. Recuperat de <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03534.3>

Balli, M., Sari, O., Mahmed, C., Besson, C., Bonhote, P., Duc, D., Forchelet, J. (2012). A pre-industrial magnètic cooling System for room temperature application. *Applied Energy*, 98, 556-561. Recuperat de <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.034>

Belo, J.H., Pires, A.L., Araújo, J.P., Pereira, A.M. (2019). Magnetocaloric materials: From micro- to nanoscale. *Journal of Materials Research*, 34, 134-137. Recuperat de <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.352>

Burdyny, T. (2012). *Simplified Modeling of Active Magnetic Regenerators*. (Treball fi de màster, University of Victoria). Recuperat de <https://www.uvic.ca/research/centres/iesvic/assets/docs/dissertations/Dissertation-Burdyny.pdf>

Caballero-Flores, R., Sánchez, T., Rosa, W.O., García, J., González-Legarreta, L., Serantes, D., Prida, V.M., Escoda, Ll., Suñol, J.J., Hernando, B. (2012). On turning the magnetocaloric effect in Ni-Mn-In Heusler alloy ribbons with thermal treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 545, 216-221. Recuperat de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jalicom.2012.07.151>

Chaudron, J.B., Muller, C., Hittinger, M., Risser, M., Lionte, S. (2018). Performance measurements on a large-scale magnetocaloric cooling application at room temperature. *Thermag VIII*, 16-20. doi: 10.18462/iir.thermag.2018.0022

Chieda, Y., Kanomata, T., Fukushima, K., Matsubayashi, K., Uwatoko, Y., Kainuma, R., Oikawa, K., Ishida, K., Obara, K., Shishido, T. (2009). Magnetic properties of Mn-rich Ni<sub>2</sub>MnSn Heusler alloys under pressure. *Journal of Alloys and Compounds*, 486, 51-54. doi: 10.1016/j.jalicom.2009.06.206

Coll, R. (2018). *Producció i caracterització d'aliatges Heusler: Ni-Mn-(In,Sn)*. (Tesis no publicada). Universitat de Girona, Catalunya.

Comas, X. (2019). *Estudi comparatiu entre la refrigeració magnètica i la refrigeració convencional*. (Treball fi de grau no publicat). Universitat de Girona, Catalunya.

De Oliveira, N.A., von Ranke, P.J. (2010). Theoretical aspects of the magnetocaloric effect. *Physics Reports*, 489, 89-159. doi: 10.1016/j.phyrep.2009.12.006

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

Eriksen, D. (2016). *Active magnetic regenerator refrigeration with rotatory multi-bed Technology*. (Tesi doctoral, Technical University of Denmark, Dinamarca) Recuperat de [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/127460079/Active\\_magnetic\\_regenerator.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/127460079/Active_magnetic_regenerator.pdf)

Eriksen, D., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H. (2015). An active magnetic Device. *International patent no.: WO2015118007*

Engelbrecht, K., Eriksen, D., Bahl, C.R.H., Bjørk, R., Geyti, J., Lozano, J., Nielsen, K.K., Saxild, F.B., Smith, A., Pryds, N. (2012). Experimental results for a novel rotary active magnetic regenerator. *International Journal of Refrigeration*, 35, 1498-1505. doi: 10.1016/j.jirefrig.2012.05.003

Fraga, G.I.F., Barco, R., Pureur, P. (2010). Impedance and Magnetic Permeability of Soft Ferromagnetic Metals. *J Supercond Nov Magn*, 23, 99-102. doi: 10.1007/s10948-009-0538-x

Franco, V., Blázquez, J.S., Ipus, J.J., Law, J.Y., Moreno-Ramírez, L.M., Conde, A. (2018). Magnetocaloric effect: From materials research to refrigeration devices. *Progress in Material Science*, 93, 112-232. Recuperat de <https://doi.org/10.1016/j.pmarsci.2017.10.005>

Gschneider Jr., K.A., Percharsky, V.K. (2008). Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects. *International Journal of Refrigeration*, 31, 945-961. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2008.01.004

Huang, B., Lai, J.W., Zeng, Z.G., Harrison, B., Oort, A., van Dijk, N.H., Brück, E. (2019). Development of an experimental rotary magnetic refrigerator prototype. *International Journal of Refrigeration*, 104, 47-50. Recuperat de <https://doi.org/j.ijrefrig.2019.04.029>

Johra, H., Filonenko, K., Heiselberg, P., Veje, C., Dall'Olio, S., Engelbrecht, K., Bahl, C. (2019). Integration of a magnetocaloric heat pump in an energy flexible residential Building. *Renewable Energy*, 136, 115-126. Recuperat de <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.102>

Lozano, J. A., Capovilla, M.S., Trevizoli, P.V., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H., Barbosa Jr., J.R. (2016). Development of a novel rotatory magnètic refrigerator

Maiorino, A., Mauro, A., Gesù Del Luca, M., Mota-Babiloni, A., Aprea, C. (2019). Looking for Energy Losses of a Rotary Permanent Magnet Magnetic Refrigerator to Optimize its Performance. *Energies*, 12, 1-21. doi: 10.3390/en12224388

Mezaal, N.A., Osintsev, K.V., Zhirgalova, T.B. (2017). Review of magnetic refrigeration system as alternative to conventional refrigeration system. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 87, 1-7. doi: 10.1088/1755-1315/87/3/032024

Moran, M.J. i Shapiro, H.N. (2006). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics: SI version*. (5a edició) West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.



Özgirgin, E., Çamalan, C., Koçak, E. (27 de febrer del 2020). *ME211 Thermodynamics: Tables*. Recuperat de [http://me211.cankaya.edu.tr/uploads/files/Thermodynamic\\_tables\\_SI\\_units.pdf](http://me211.cankaya.edu.tr/uploads/files/Thermodynamic_tables_SI_units.pdf)

Pecharsky, V.K., Gschneidner Jr., K.A. (2001) Some common misconceptions concerning magnetic refrigerant materials. *Journal of Applied Physics*, 90, 4614-4622. Recuperat de <https://doi.org/10.1063/1.1405836>

Qian, S., Yuan, L., Yu, J., Yan, G. (2018). Variable load control strategy for room-temperature magnetocaloric cooling applications. *Energy*, 153, 763-775. Recuperat de <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.104>

Romero, J. (2013). *Estudio de la generación de temperaturas subambientales en un proceso termodinámico basado en el efecto magnetocalórico mediante prototipado y análisis termomagnético*. (Tesi doctoral, Universitat de A Coruña, Galicia) Recuperat de <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/10317>

Reglamento (UE) 517/2014 del Parlament Europeu i del Consell, de 16 d'abril del 2014, sobre els gasos fluorats d'efecte hivernacle i pel qual es deroga el Reglament (CE) 842/2006, Diari Oficial de la Unió Europea § 150/195 a 150/230 (2014)

Tishin, A.M., Spichkin, Y.I. (2003). *The magnetocaloric effect and its Applications*. Bristol: Institute of Physics Pub.

Trevizoli, P.V., Nakashima, A.T., Peixer, G.F., Barbosa Jr., J.R. (2016). Performance evaluation of an active magnetic regenerator for cooling applications – part I: Experimental analysis and thermodynamic performance. *International Journal of Refrigeration*, 72, 192-205. Recuperat de <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.07.009>

Tušek, J., Zupan, S., Šarlah, A., Prebil, I., Poredoš, A. (2010). Development of a rotatory magnetic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 33, 294-300. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.11.003

Utaka, Y., Hu, K., Chen, Z., Zhao, Y. (2019). Application of simple and effective thermal switch for solid-state magnetic refrigeration at room temperature. *Applied Thermal Engineering*, 155, 196-205. Recuperat de <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.127>

Yao, G.H., Gong, M.Q., Wu, J.F. (2006). Experimental study on the performance of a room temperature magnetic refrigerator using permanent magnets. *International Journal of Refrigeration*, 29, 1267-1273. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2006.07.010

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

Yu, B.F., Gao, Q., Zhang, B., Meng, X.Z., Chen, Z. (2003). Review on research of room temperature magnetic refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, 26, 622-636. doi: 10.1016/S0140-7007(03)00048-3

Zhang, X., Zhang, H., Qian, M., Geng, L. (2018). Enhanced magnetocaloric effect in Ni-Mn-Sn-Co alloys with two successive magnetostructural transformations. *Scientific Reports*, 1-11. doi: 10.1038/s41598-018-26564-5

Zheng, Z.G., Yu, H.Y., Zhong, X.C. Zeng, D.C., Liu, Z.W. (2009). Design and performance of an active magnetic refrigerator for room-temperature application. *International Journal of Refrigeration*, 32, 78-86. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2008.06.004

## ANNEXOS

### ANNEX A: TAULES DE RESULTATS DE LES COMPARACIONS ENTRE CICLES

#### Taules de resultats

Composició del MCM	T <sub>c</sub> (K)	T <sub>H</sub> (K)	ΔT <sub>span</sub>	RC <sub>eff</sub> (J/kg)	COP <sub>id</sub>
Gd <sub>5</sub> Ge <sub>1,9</sub> Si <sub>2</sub> Fe <sub>0,1</sub>	264,12	329,41	65,29	354,33	4,05
La <sub>0,8</sub> Gd <sub>0,2</sub> Fe <sub>11,4</sub> Si <sub>1,6</sub>	190,00	211,18	21,18	279,53	8,97
Gd <sub>5</sub> Ge <sub>2</sub> Si <sub>2</sub>	265,88	297,65	31,76	244,09	8,37
Tb <sub>4</sub> Gd <sub>1</sub> Si <sub>2,035</sub> Ge <sub>1,035</sub> Mn <sub>0,03</sub>	133,53	149,41	15,88	232,28	8,41
La <sub>0,8</sub> Ce <sub>0,2</sub> Fe <sub>11,4</sub> Si <sub>1,6</sub> B <sub>0,3</sub>	184,71	202,35	17,65	456,69	10,47
La <sub>0,8</sub> Ce <sub>0,2</sub> Fe <sub>11,4</sub> Si <sub>1,6</sub> B <sub>0,1</sub>	179,41	197,06	17,65	409,45	10,17

Taula 2: Exemples de MCM amb valors RC<sub>eff</sub> elevats amb les seves temperatures d'operació. Valors obtinguts a partir de Zhang et al. (2018). Elaboració pròpia.

La numeració dels diferents grups ha estat seleccionada considerant que el primer número correspon a l'ordre que els prototips han estat tractats a l'estudi mentre que la lletra correspon als resultats que es parla dintre de l'article corresponent.

Grup	T <sub>H</sub> (K)	T <sub>c</sub> (K)	ΔT <sub>span</sub> (K)	W <sub>c</sub> (kJ/kg)	ER (kJ/kg)	COP	COP <sub>id</sub>	% COP <sub>id</sub>
1-A	294,25	274,58	19,67	90,65	1163,33	12,83	13,96	91,93%
1-B	290,25	273,92	16,33	74,86	1181,76	15,79	16,77	94,12%
2-A	295,00	287,20	7,80	33,27	1171,52	35,21	36,82	95,63%
2-B	295,00	285,40	9,60	41,38	1170,03	28,27	29,73	95,10%
2-C	295,00	283,40	11,60	50,60	1168,28	23,09	24,43	94,50%
3-A	321,97	306,47	15,50	54,53	1058,25	19,41	19,77	98,15%
4-A	300,00	285,00	15,00	64,24	1145,63	17,83	19,00	93,85%
4-B	300,00	280,00	20,00	88,44	1141,07	12,90	14,00	92,16%
5-A	297,26	288,36	8,90	38	1161,63	30,96	32,40	95,56%
5-B	297,22	281,82	15,40	67,56	1156,18	17,11	18,30	93,52%

Taula 3: Resultats dels diferents cicles convencionals equivalents. Elaboració pròpia.

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

Grup	$m_{MCE}$ (kg)	f (Hz)	$T_H$ (K)	$T_C$ (K)	$\Delta T_{span}$ (K)	$\dot{Q}_c$ (w)	Losses (w)	RC (J/kg)	COP	COPid	% COPid
1-A	5,5000	1,12	294,25	274,58	19,67	768,0	91,6	124,68	8,38	13,96	60,06%
1-B	5,5000	1,12	290,25	273,92	16,33	900,0	92,6	146,10	9,72	16,77	57,94%
2-A	1,1800	0,50	295,00	287,20	7,80	40,2	27,7	68,14	1,45	36,82	3,94%
2-B	1,1800	1,20	295,00	285,40	9,60	102,4	55,4	72,32	1,85	29,73	6,22%
2-C	1,1800	1,70	295,00	283,40	11,60	162,4	102,1	80,96	1,59	24,43	6,51%
3-A	1,7000	0,67	321,97	306,47	15,50	81,5	22,9	71,55	3,56	19,77	18,00%
4-A-1	0,1955	0,50	300,00	285,00	15,00	10,0	5,2	102,30	1,92	19,00	10,12%
4-B-1	0,1955	0,50	300,00	280,00	20,00	7,6	5,6	77,75	1,36	14,00	9,69%
4-A-2	0,1955	1,00	300,00	285,00	15,00	18,5	13,0	94,63	1,42	19,00	7,49%
4-B-2	0,1955	1,00	300,00	280,00	20,00	15,0	14,0	76,73	1,07	14,00	7,65%
5-A	2,8000	1,00	297,26	288,36	8,90	400,0	222,2	142,86	1,8	32,4	5,56%
5-B	2,8000	1,00	297,22	281,82	15,40	200,0	250,0	71,43	0,8	18,3	4,37%

Taula 4: Resultats dels cicles de refrigeració magnètica a partir de prototips reals. Elaboració pròpia.

### Taules d'interpolacions dels cicles convencionals

T (°C)	P (bar)	H <sub>liq. sat.</sub> (kJ/kg)	H <sub>vap. sat.</sub> (kJ/kg)	S <sub>liq.sat.</sub> (kJ/kg*K)	S <sub>vap.sat.</sub> (kJ/kg*K)
0,00	4,2962	179,96	1441,94	0,7097	5,3298
2,00	4,6270	189,26	1444,03	0,7435	5,3038
16,00	7,5324	255,18	1456,87	0,9755	5,1314
20,00	8,5762	274,26	1459,90	1,0404	5,0849
24,00	9,7274	293,45	1462,61	1,1048	5,0394
1,58	4,5575	187,31	1443,59	0,7364	5,3093
0,92	4,4484	184,24	1442,90	0,7252	5,3178
17,25	7,8586	261,14	1457,82	0,9958	5,1169
21,25	8,9360	280,26	1460,75	1,0605	5,0707

Taula 5: Valors dels focus del cicle complementari al prototip de Chaudron et al (2018). Elaboració pròpia.

P (bar)	H <sub>baixa</sub> (kJ/kg)	H <sub>alta</sub> (kJ/kg)	S <sub>baixa</sub> (kJ/kg*K)	S <sub>alta</sub> (kJ/kg*K)
7,0000	1500,15	1526,45	5,3104	5,3958
7,0000		1502,44		5,3178
8,0000	1520,53	1546,77	5,3161	5,3986
8,0000		1521,08		5,3178
<b>7,8586</b>		<b>1518,45</b>		<b>5,3178</b>
8,0000	1493,29	1520,53	5,2277	5,3161
8,0000		1518,42		5,3093
9,0000	1514,45	1541,47	5,2436	5,3286
9,0000		1535,32		5,3093
<b>8,9360</b>		<b>1534,24</b>		<b>5,3093</b>

Taula 6: Càlculs per trobar els valors  $h_2$  mitjançant interpolacions bilineals del cicle complementari al prototip de Chaudron et al (2018). Elaboració pròpia.

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

T (°C)	P (bar)	H <sub>liq. sat.</sub> (kJ/kg)	H <sub>vap. sat.</sub> (kJ/kg)	S <sub>liq.sat.</sub> (kJ/kg*K)	S <sub>vap.sat.</sub> (kJ/kg*K)
10,00	6,1529	226,75	1451,78	0,8769	10,00
12,00	6,5890	236,20	1453,55	0,9099	12,00
16,00	7,5324	255,18	1456,87	0,9755	16,00
20,00	8,5762	274,26	1459,90	1,0404	20,00
24,00	9,7274	293,45	1462,61	1,1048	24,00
14,20	7,1079	246,64	1455,38	0,9460	14,20
12,40	6,6833	238,10	1453,88	0,9165	12,40
10,40	6,2401	228,64	1452,13	0,8835	10,40
22,00	9,1518	283,86	1461,26	1,0726	22,00

Taula 7: Valors dels focus del cicle complementari al prototip de Huang et al. (2019). Elaboració pròpia.

P (bar)	H <sub>baixa</sub> (kJ/kg)	H <sub>alta</sub> (kJ/kg)	S <sub>baixa</sub> (kJ/kg*K)	S <sub>alta</sub> (kJ/kg*K)
9,0000	1486,20	1514,45	5,1520	5,2436
9,0000		1486,47		5,1529
10,0000	1478,88	1508,20	5,0816	5,1768
10,0000		1500,83		5,1529
<b>9,1518</b>		<b>1488,65</b>		<b>5,1529</b>
9,0000	1486,20	1514,45	5,1520	5,2436
9,0000		1493,09		5,1743
10,0000	1478,88	1508,20	5,0816	5,1768
10,0000		1507,44		5,1743
<b>9,1518</b>		<b>1495,27</b>		<b>5,1743</b>
9,0000	1486,20	1514,45	5,1520	5,2436
9,0000		1500,53		5,1985
10,0000	1508,20	1536,06	5,1768	5,2644
10,0000		1515,09		5,1985
<b>9,1518</b>		<b>1502,74</b>		<b>5,1985</b>

Taula 8: Càlculs per trobar els valors h<sub>2</sub> mitjançant interpolacions bilineals del cicle complementari al prototip de Huang et al. (2019). Elaboració pròpia.

T (°C)	P (bar)	H <sub>liq. sat.</sub> (kJ/kg)	H <sub>vap. sat.</sub> (kJ/kg)	S <sub>liq.sat.</sub> (kJ/kg*K)	S <sub>vap.sat.</sub> (kJ/kg*K)
32,00	12,3800	332,17	1467,03	1,2319	32,00
36,00	13,8960	351,69	1486,70	1,2946	36,00
45,00	17,8190	396,13	1470,96	1,4341	45,00
50,00	20,3310	421,17	1471,26	1,5109	50,00
33,47	12,9354	339,32	1474,24	1,2549	33,47
48,97	19,8112	415,99	1471,20	1,4950	48,97

Taula 9: Valors dels focus del cicle complementari al prototip de Eriksen (2016). Elaboració pròpia.

P (bar)	H <sub>baixa</sub> (kJ/kg)	H <sub>alta</sub> (kJ/kg)	S <sub>baixa</sub> (kJ/kg*K)	S <sub>alta</sub> (kJ/kg*K)
18,0000	1471,01	1521,19	4,8086	4,9627
18,0000		1512,21		4,9351
20,0000	1509,54	1573,27	4,8838	5,0696
20,0000		1527,14		4,9351
<b>19,8112</b>		<b>1525,73</b>		<b>4,9351</b>

Taula 10: Càlculs per trobar els valors  $h_2$  mitjançant interpolacions bilineals del cicle complementari al prototip de Eriksen (2016). Elaboració pròpia.

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

T (°C)	P (bar)	H <sub>liq. sat.</sub> (kJ/kg)	H <sub>vap. sat.</sub> (kJ/kg)	S <sub>liq. sat.</sub> (kJ/kg*K)	S <sub>vap. sat.</sub> (kJ/kg*K)
6,00	5,3479	207,95	1448,04	0,8105	5,2529
8,00	5,7395	217,34	1449,94	0,8438	5,2279
24,00	9,7274	293,45	1462,61	1,1048	5,0394
28,00	10,9930	312,75	1465,00	1,1386	4,9948
7,00	5,5437	212,65	1448,99	0,8272	5,2404
12,00	6,5890	236,20	1453,55	0,9099	5,1791
27,00	10,6766	307,93	1464,40	1,1302	5,0060

Taula 11: Valors dels focus del cicle complementari al prototip de Trevisoli et al. (2016). Elaboració pròpia.

P (bar)	H <sub>baixa</sub> (kJ/kg)	H <sub>alta</sub> (kJ/kg)	S <sub>baixa</sub> (kJ/kg*K)	S <sub>alta</sub> (kJ/kg*K)
10,0000	1508,20	1536,06	5,1768	5,2644
10,0000		1528,43		5,2404
12,0000	1553,07	1606,56	5,2347	5,3906
12,0000		1555,03		5,2404
<b>10,6766</b>		<b>1537,43</b>		<b>5,2404</b>
10,0000	1508,20	1536,06	5,1768	5,2644
10,0000		1508,93		5,1791
12,0000	1495,18	1553,07	5,0553	5,2347
12,0000		1535,13		5,1791
<b>10,6766</b>		<b>1517,79</b>		<b>5,1791</b>

Taula 12: Càlculs per trobar els valors  $h_2$  mitjançant interpolacions bilineals del cicle complementari al prototip de Trevisoli et al. (2016). Elaboració pròpia.



T (°C)	P (bar)	H <sub>liq. sat.</sub> (kJ/kg)	H <sub>vap. sat.</sub> (kJ/kg)	S <sub>liq.sat.</sub> (kJ/kg*K)	S <sub>vap.sat.</sub> (kJ/kg*K)
8,00	5,7395	217,34	1449,94	0,8438	8,00
10,00	6,1529	266,75	1451,78	0,8769	10,00
12,00	6,5890	236,20	1453,55	0,9099	12,00
16,00	7,5324	255,18	1456,87	0,9755	16,00
24,00	9,7274	293,45	1462,61	1,1048	24,00
28,00	10,9930	312,75	1465,00	1,1386	28,00
8,82	5,9090	237,60	1450,69	0,8574	8,82
15,36	7,3815	252,14	1456,34	0,9650	15,36
24,22	9,7970	294,51	1462,74	1,1067	24,22
24,26	9,8097	294,70	1462,77	1,1070	24,26

Taula 13: Valors dels focus del cicle complementari al prototip de Engelbrecht et al. (2012). Elaboració pròpia.

P (bar)	H <sub>baixa</sub> (kJ/kg)	H <sub>alta</sub> (kJ/kg)	S <sub>baixa</sub> (kJ/kg*K)	S <sub>alta</sub> (kJ/kg*K)
9,0000	1486,20	1514,45	5,1520	5,2436
9,0000		1506,50		5,2178
10,0000	1508,20	1536,06	5,1768	5,2644
10,0000		1521,24		5,2178
<b>9,7970</b>		<b>1518,25</b>		<b>5,2178</b>
9,0000	1460,97	1486,20	5,0675	5,1520
9,0000		1482,33		5,1390
10,0000	1478,88	1508,20	5,0816	5,1768
10,0000		1496,57		5,1390
<b>9,8097</b>		<b>1493,86</b>		<b>5,1390</b>

Taula 14: Càlculs per trobar els valors  $h_2$  mitjançant interpolacions bilineals del cicle complementari al prototip de Engelbrecht et al. (2012). Elaboració pròpia.



## ANNEX B: DISSENY I MAGNETITZACIÓ

### Disseny del prototip conceptual

S'han dissenyat dos models diferents amb l'objectiu de comparar-los i obtenir uns resultats. En el moment de la seva anàlisi amb el programa FEMM ha estat necessari triar els diferents materials que componen el prototip i en els dos casos s'ha seleccionat els mateixos materials no magnetocalòrics. Aquest disseny ha estat seleccionat degut a la senzillesa de les formes requerides, la facilitat de ser dibuixat en el programa FEMM permeten molts de canvis fàcilment aplicables en poques operacions, juntament amb l'experiència prèvia obtinguda de la tesi doctoral d'Eriksen (2016).

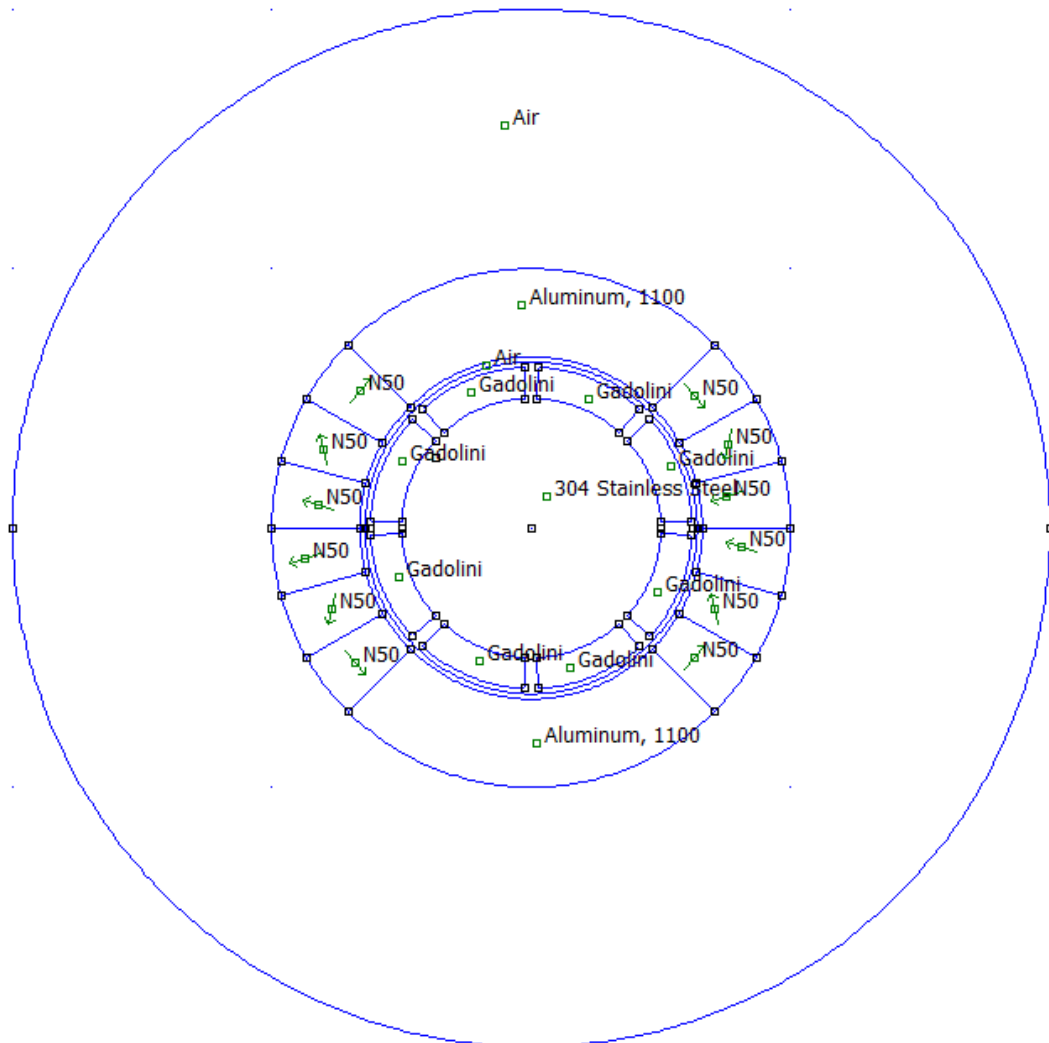


Figura 23: Dibuix del prototip B utilitzant el programa FEMM amb tots els diferents elements que el formen. Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

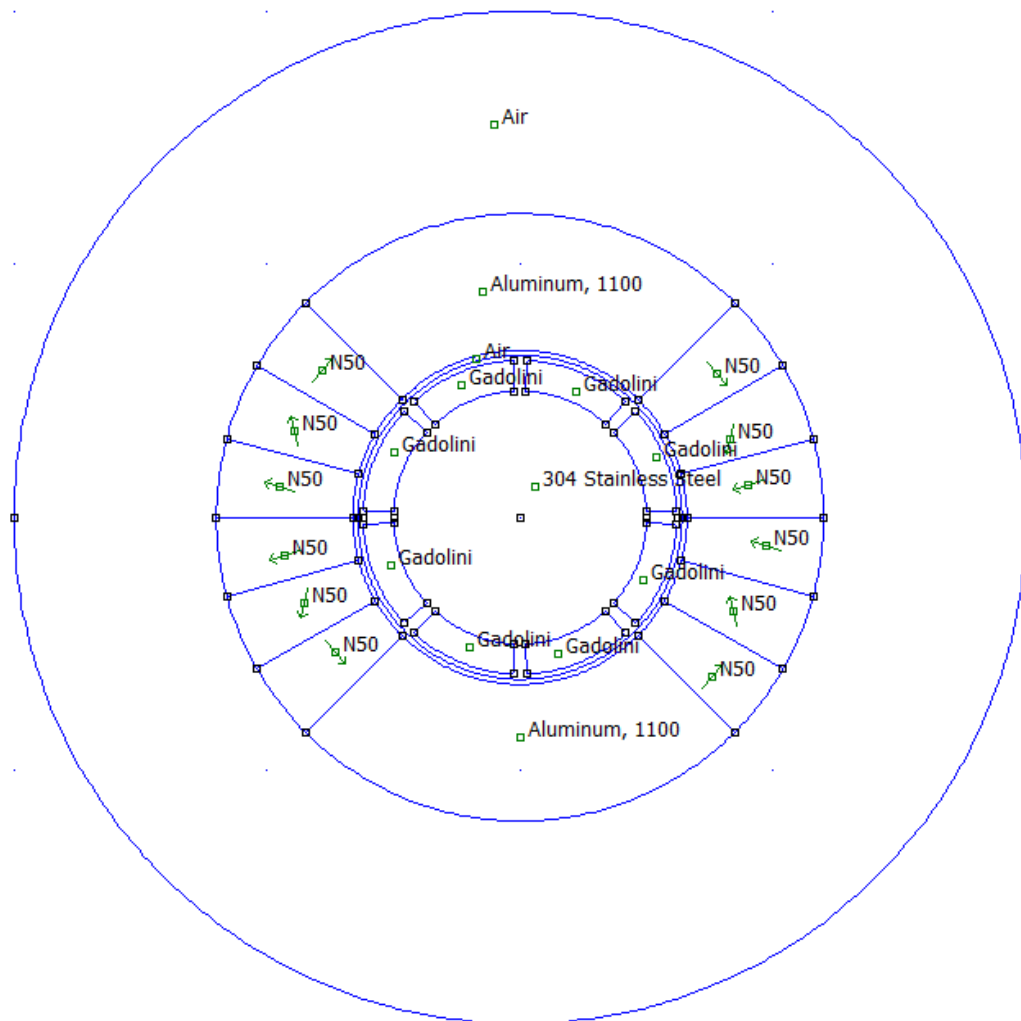
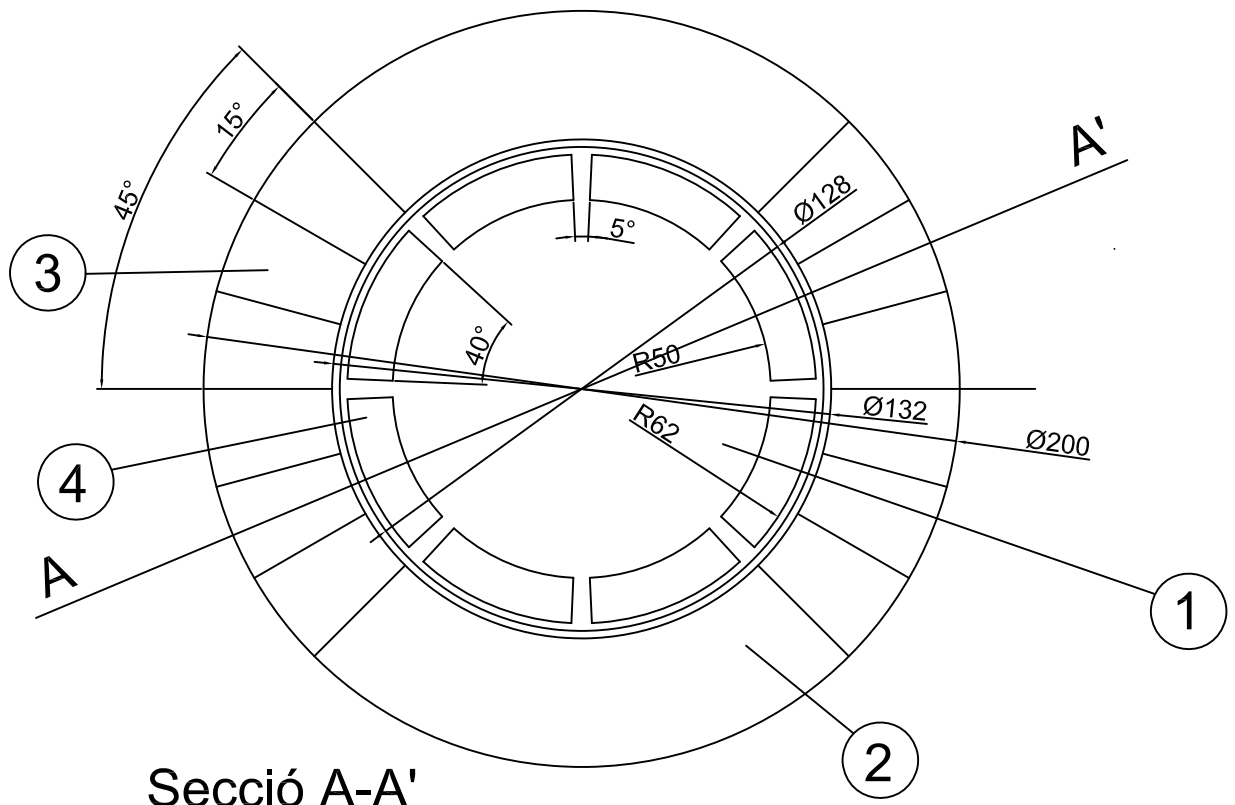
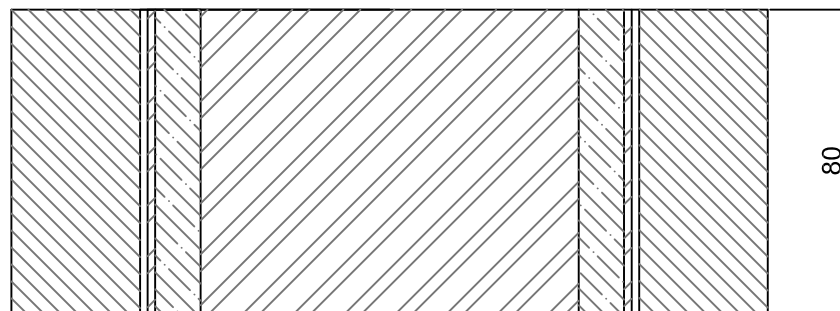


Figura 24: Dibuix del prototip A utilitzant el programa FEMM amb tots els diferents elements que el formen. Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.

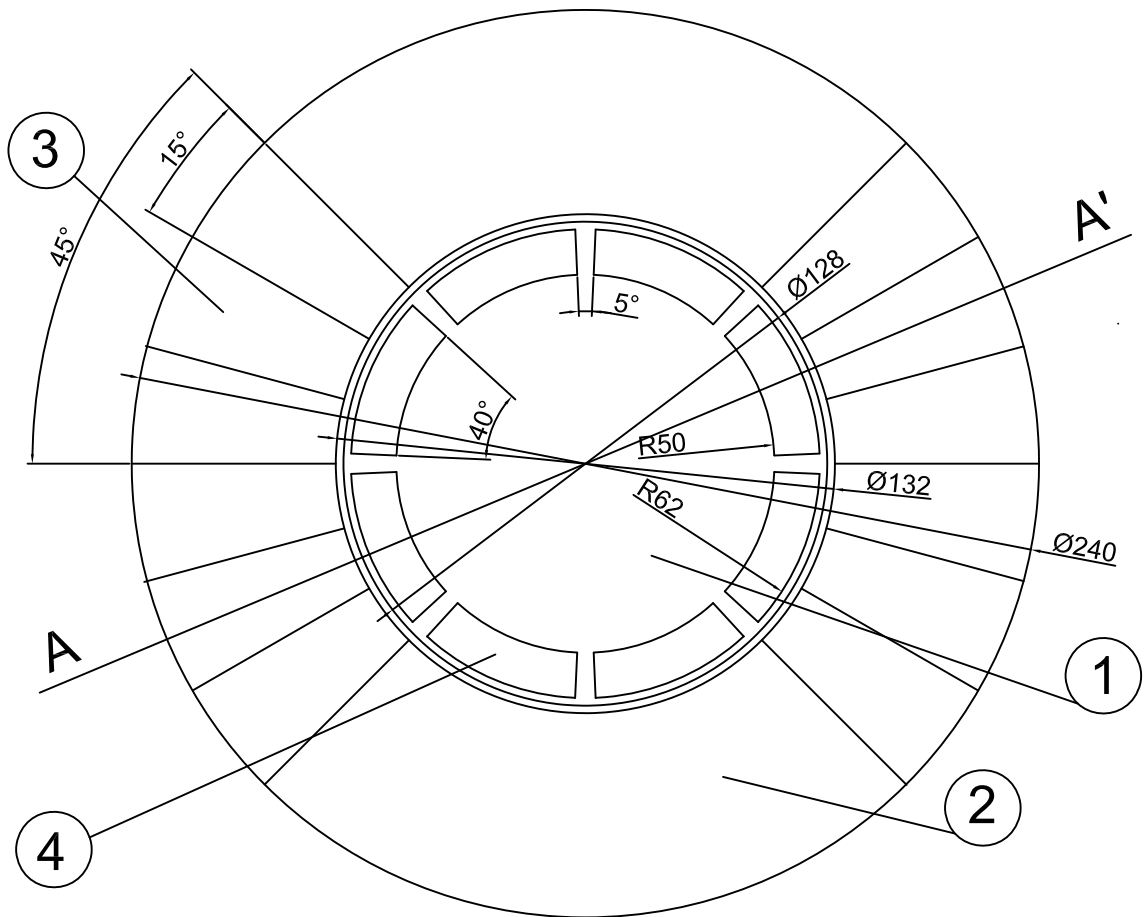


Secció A-A'

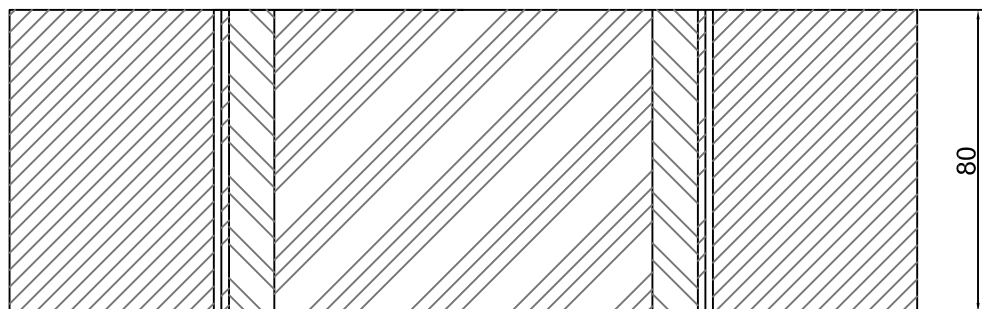


4	Material Magnetocalòric	8		Gadolini
3	Imant permanent N50	12		
2	Suport dels imants del rotor	2		Alumini 1100
1	Nucli	1		Acer no magnètic
<b>Marca</b>	<b>Denominació i observacions</b>	<b>Nombre de peces</b>	<b>Norma</b>	<b>Material</b>

	<i>Data</i>	<i>Nom</i>	<i>Cognom</i>	
<i>Dibuixat</i>	07/06/2020	Eloi	Fanals	
<i>Comprovat</i>				
<i>Id. s.Norma</i>			ISO - UNE	
<i>Escala:</i>	<b>Projecte: Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional</b>			<i>Material: Notació normalitzada</i>
1:2	<b>Secció principal del prototip A</b>			<i>Toleràncies no indicades</i> S. UNE-EN 22768-mH
				<i>Plànol n: 01-002-A</i>



Secció A-A'



4	Material Magnetocalòric	8		Gadolini
3	Imant permanent N50	12		
2	Suport dels imants del rotor	2		Alumini 1100
1	Nucli	1		Acer no magnètic

Marca	Denominació i observacions	Nombre de peces	Norma	Material
-------	----------------------------	-----------------	-------	----------

	Data	Nom	Cognom
Dibuixat	07/06/2020	Eloi	Fanals
Comprovat			
Id. s.Norma			ISO - UNE



**EPS**

**UdG**

Escola Politècnica Superior

Escala:  1:2	<b>Projecte:</b> Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional	Material: Notació normalitzada
	<b>Secció principal del prototip B</b>	Toleràncies no indicades S. UNE-EN 22768-mH
		Plànol n: 01-002-A

## Camps magnètics dels aliatges de recerca de la UdG

El conjunt d'aliatges obtinguts del grup de recerca ha estat analitzat el camp magnètic resultant en l'aplicació d'aquests materials en el prototip A on així es pot veure el camp magnètic resultant permeten una futura aproximació de l'aplicació d'aquest material al disseny proposat.

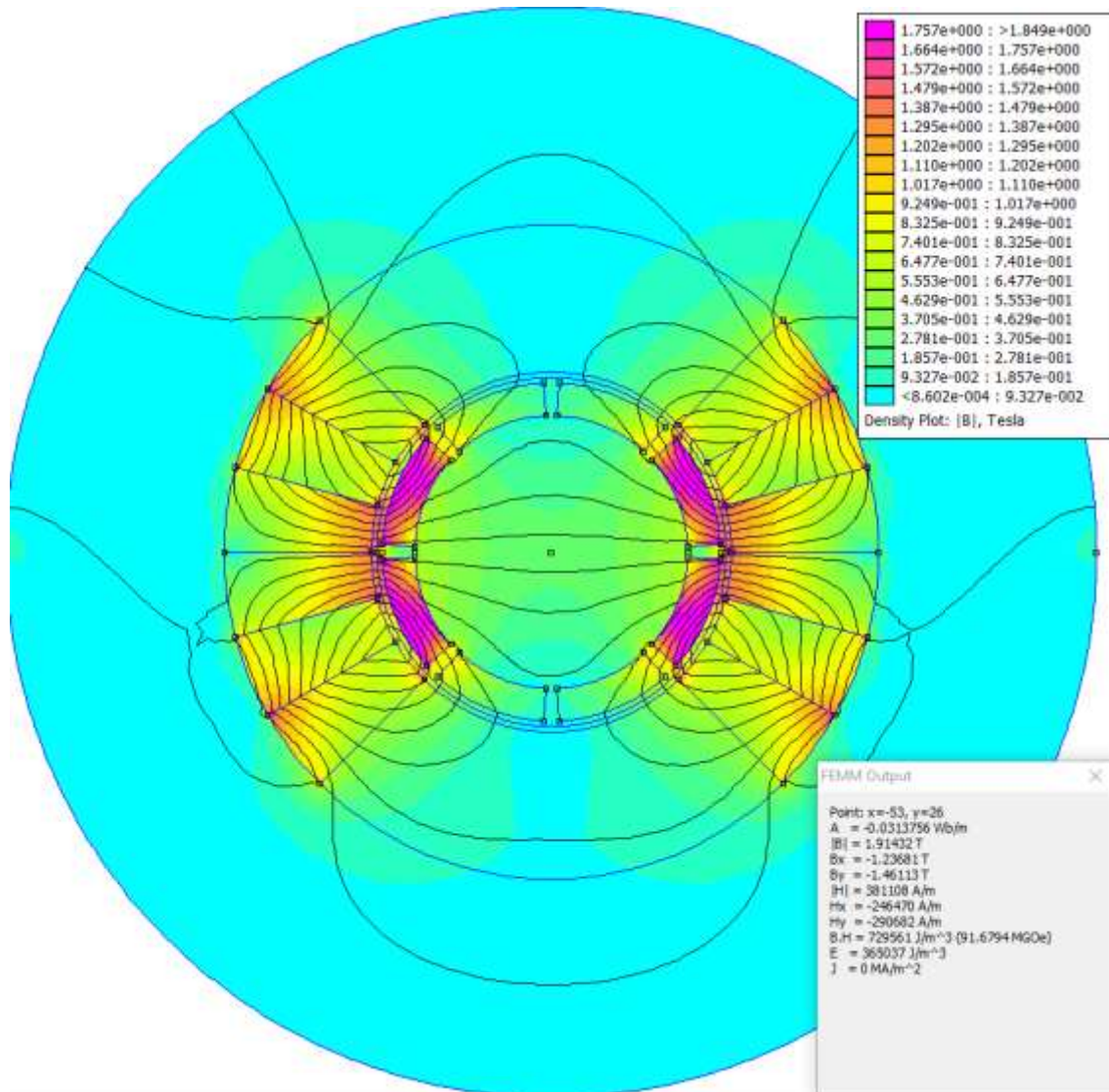


Figura 25: Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric  $Mn_{50}Ni_{40}Sn_{10}$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

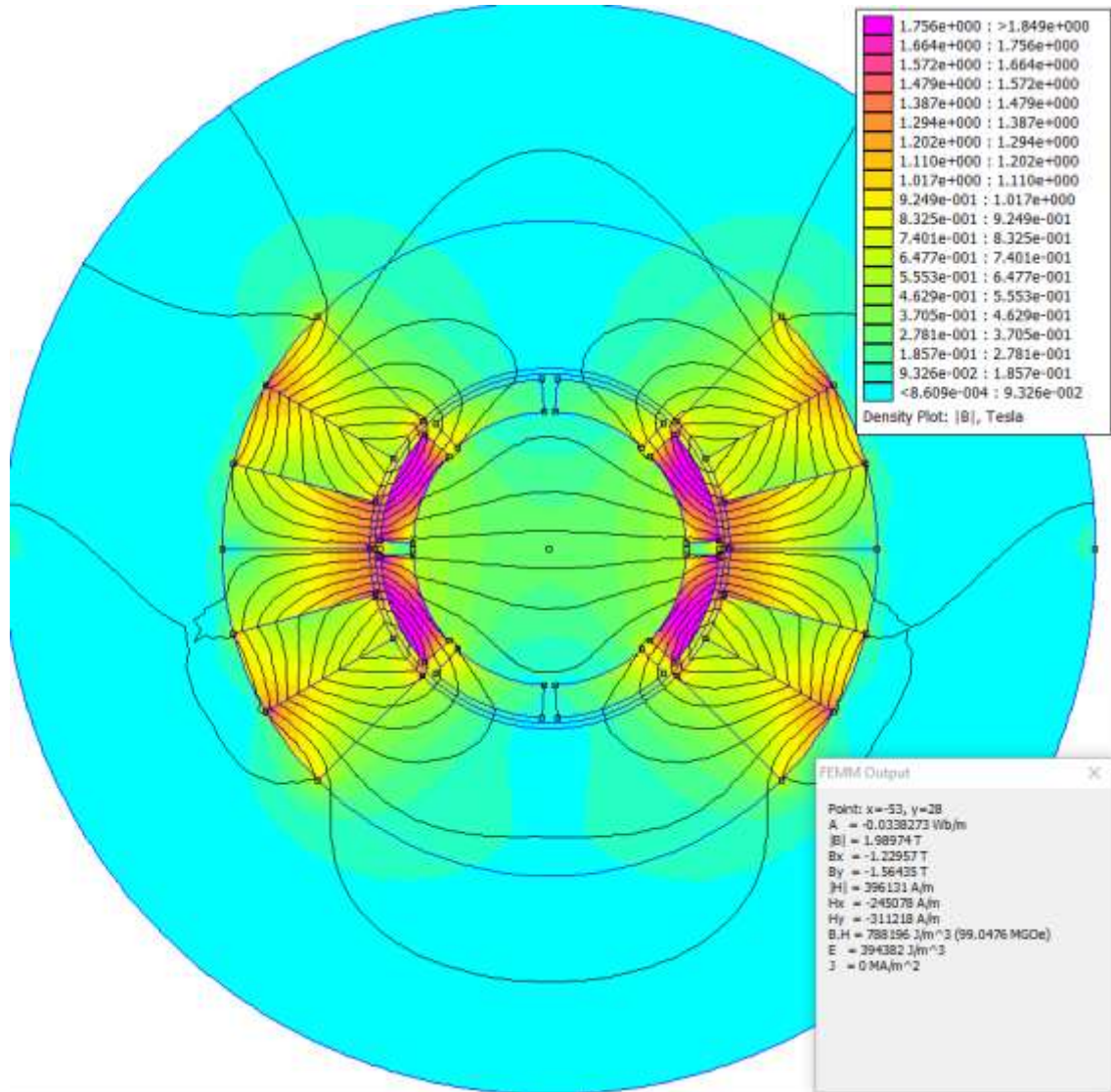


Figura 26: Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric  $Mn_{50}Ni_{42.5}Sn_{7.5}$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.



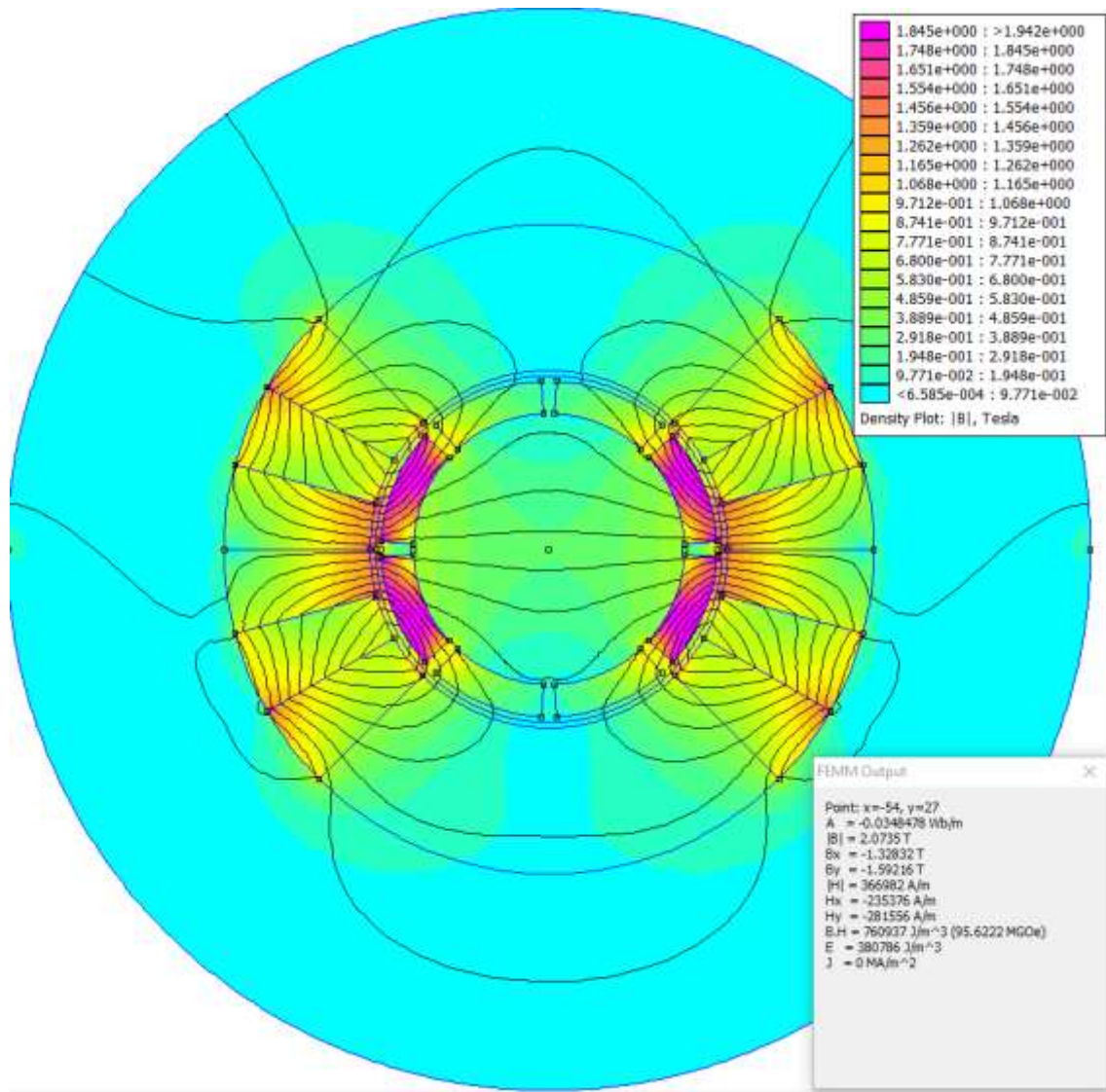


Figura 27: Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric  $Mn_{50}Ni_{45}Sn_5$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

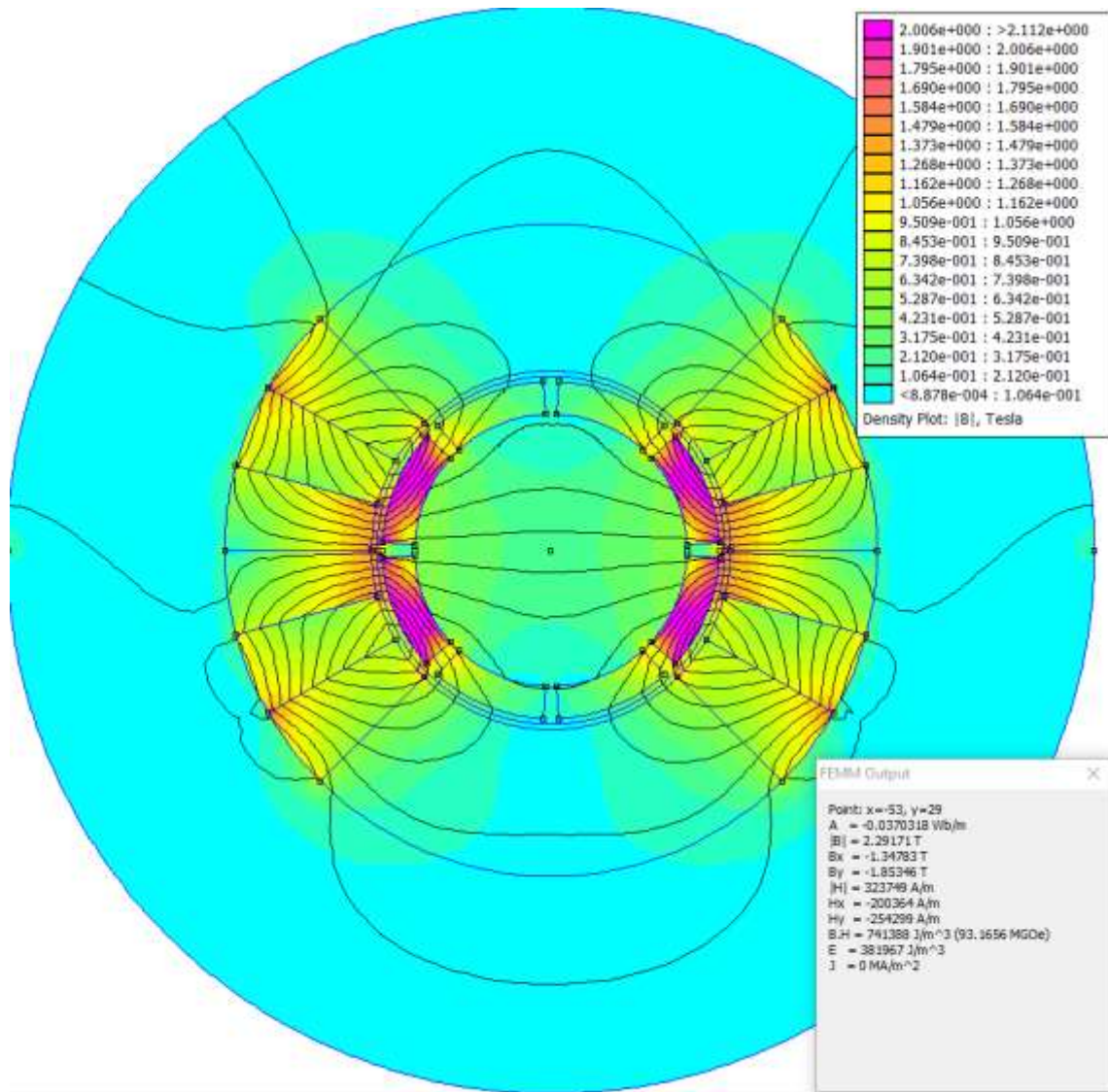


Figura 28: Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric  $Ni_{48}Mn_{36}Sn_{14}Cu_2$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.

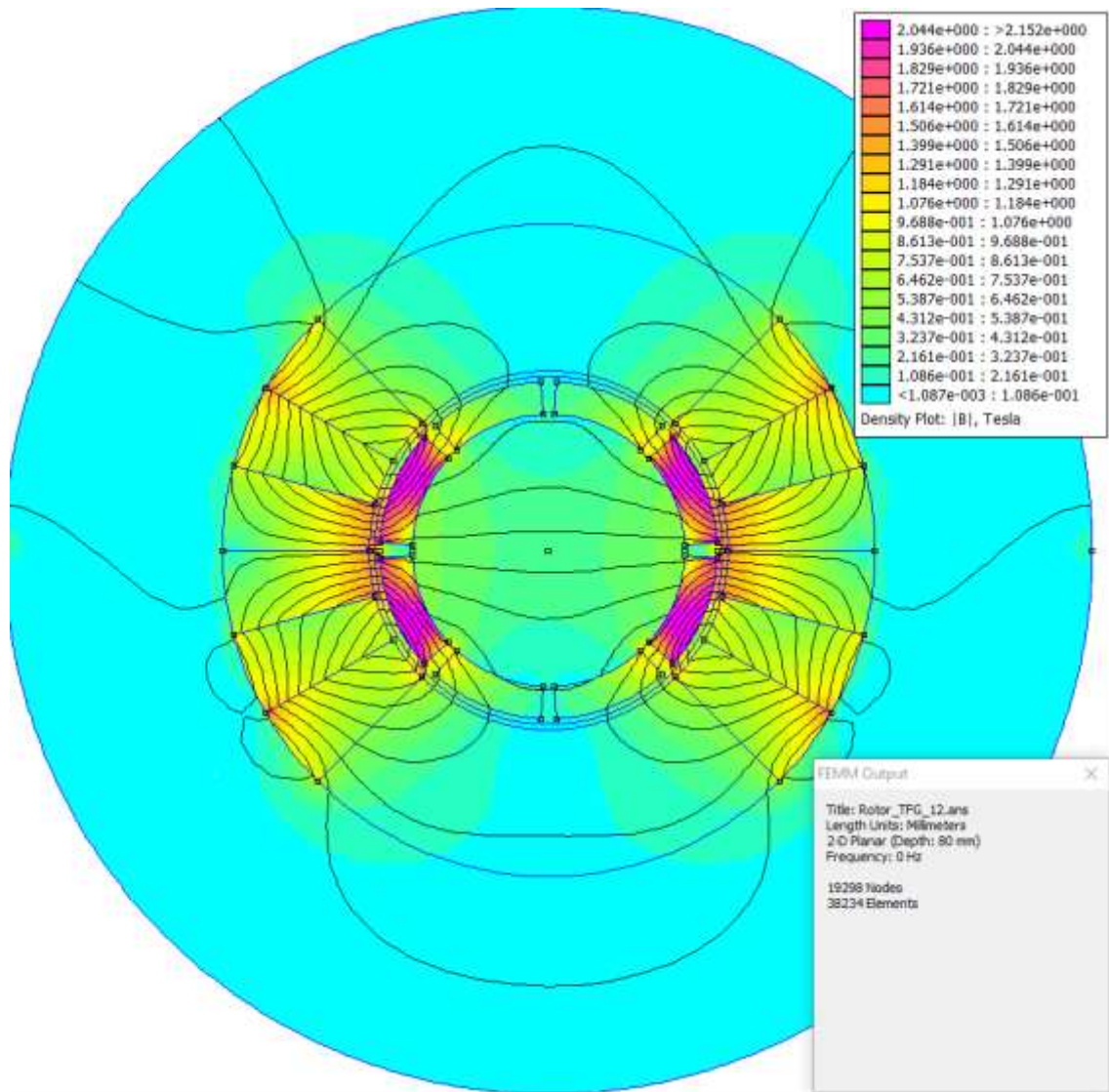


Figura 29: : Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric  $Ni_{47}Mn_{36}Sn_{14}Ti$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.



## Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

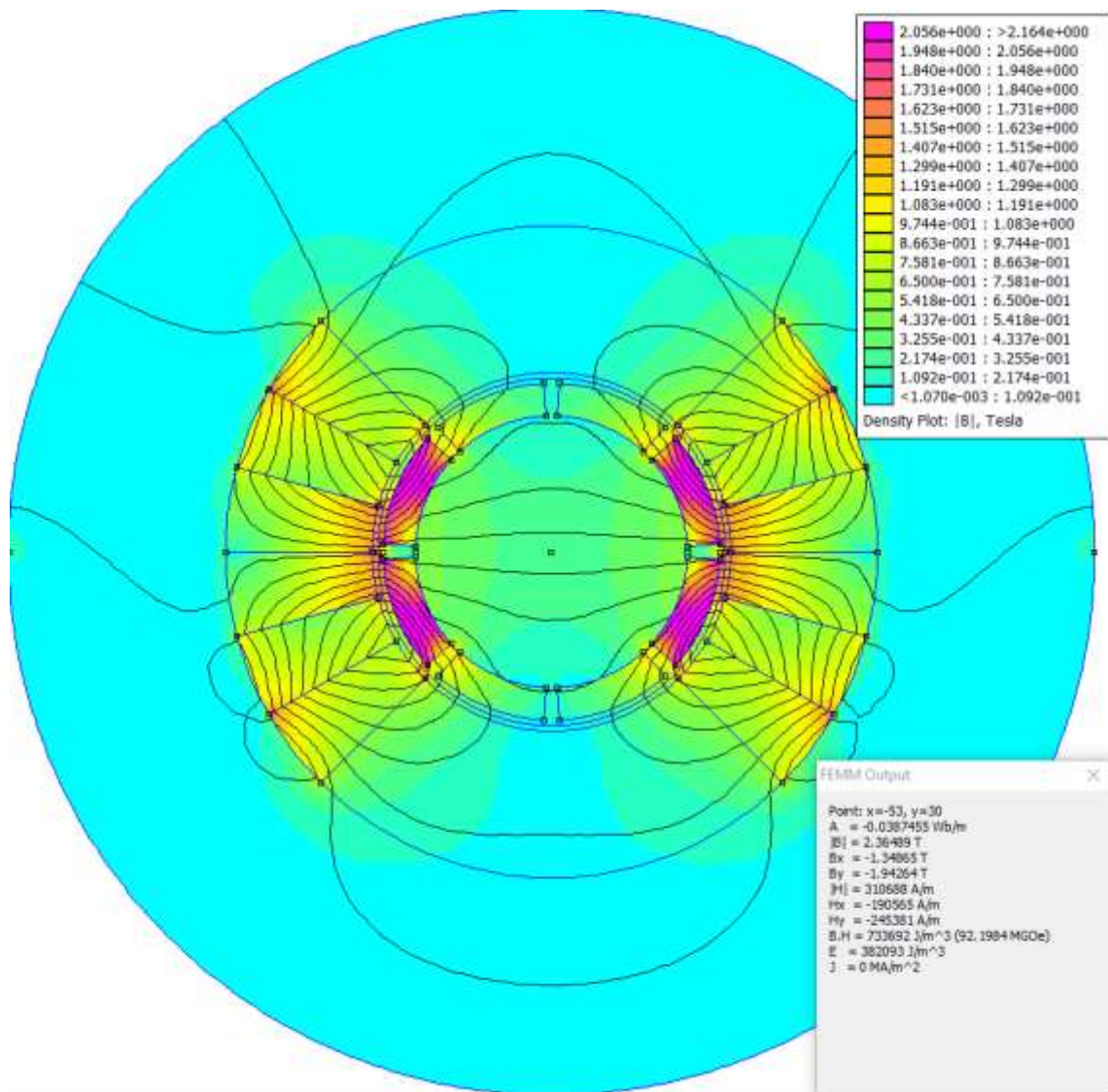


Figura 30: Camp magnètic del prototip utilitzant com a material magnetocalòric  $Ni_{49}Mn_{36}Sn_{14}Cu$ . Elaboració pròpia mitjançant el programa FEMM.

Els resultats obtinguts a partir dels sis aliatges Heusler obtinguts del grup de recerca han mostrat resultats molt similars entre cada grup d'aliatges. D'una banda, el conjunt d'aliatges analitzat per Coll han obtingut resultats similars i pròxims a 1,8 T en la major part del material magnetocalòric. D'altra banda, el conjunt de resultats obtinguts a partir de Wederni ha mostrat resultats superiors als 2 T en la majoria de la superfície analitzada. Aquesta situació es donada principalment per l'efecte que té la permeabilitat relativa en els caps magnètics.

## ANNEX C: CÀLCUL DEL CONSUM DE POTÈNCIA DEL MOTOR

El consum del motor determina una de les variables claus que permeten trobar el valor del COP final, per això l'estudi requereix uns càlculs bàsics amb l'objectiu de tenir una idea del possible valor final.

El rotor està format per dues parts, l'imant i el material no magnètic que els uneix, en aquest prototip l'imant és N50 amb una densitat de 7900 kg/m<sup>3</sup> i el material no magnètic és l'alumini 1100 amb una densitat de 2700 kg/m<sup>3</sup>.

Material	Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	Volum (m <sup>3</sup> )	Massa (kg)
Alumini 1100	2700	0,000709211	1,9149
Imant N50	7900	0,000709211	5,1985
<b>Total Ø200 mm</b>			<b>7,1985</b>
Alumini 1100	2700	0,0012610	3,4077
Imant N50	7900	0,0012610	9,4026
<b>Total Ø240 mm</b>			<b>12,8103</b>

*Taula 15: Taula del càlcul de masses. Elaboració pròpia.*

Amb l'objectiu de simplificar el procés de càlcul s'ha escollit el punt que requereix més energia per moure's en els càlculs, en aquest cas és el diàmetre exterior.

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

Variable	Fórmula	Ø200	Ø240
m (kg)		7,1985	12,8103
g (m/s <sup>2</sup> )		9,81	9,81
μ <sub>s</sub>		0,8	0,8
f (Hz)		0,5	0,5
η		0,85	0,85
r (m)		0,1	0,12
ω (rad/s)	$\omega = 1 \text{ cicle} * \frac{1 \text{ volta}}{2 \text{ cicles}} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ volta}} * f$	π/2	π/2
F (N)	$F = m * g * \mu_s$	56,49	100,54
M <sub>a</sub> (N·m)	$M_a = F * r$	6,779	12,064
P <sub>m útil</sub>	$P_{m \text{ útil}} = M_a * \omega$	10,65	18,95
<b>P<sub>m</sub></b>	$P_m = \frac{P_{m \text{ útil}}}{\eta}$	<b>12,53</b>	<b>22,29</b>

Taula 16: Taula de càlcul i resultats de la potència del motor. Elaboració pròpia

## **ANNEX D: CÀLCUL DEL CONSUM DE POTÈNCIA DE LA BOMBA**

Un dels aspectes més importants juntament amb el moviment del rotor és el moviment del fluid refrigerant, a causa d'aquesta importància s'ha calculat el consum aproximat de potència que requeriria. S'utilitzarà aigua com a refrigerant.

Amb l'objectiu de calcular la potència d'impuls de la bomba es considerarà que el volum on hi ha el material magnetocalòric és un filtre, considerant que no hi ha pèrdua de material per solubilitat, permeten la utilització de les equacions de Rose. El cabal màssic requerit que s'haurà d'impulsar és de 20 g/s (Balli et al.,2012) per material magnetocalòric i les partícules de Gd es consideren esfèriques amb un diàmetre de 300 nm, que coincideix amb el diàmetre més petit d'Eriksen (2016).

Malgrat que hi hagi dos models no afecten el sistema, ja que les dimensions de l'estator són fixes i no varien entre models. En el càlcul es considera que els circuits que passen per cada regenerador només coincideixen en la bomba per fer la impulsió. També s'ha considerat que la pèrdua de càrrega que correspon tot el sistema menys el filtre s'ha considerat que és de 0,5 mca. A més a més es considera que el rendiment de la bomba és del 75%.

Estudi comparatiu del potencial energètic de la refrigeració magnètica versus refrigeració convencional

Variable	Fórmula	Resultat
$\rho_{\text{aigua}}$ (kg/m <sup>3</sup> )		1000
$\psi$		1
$\mu_{\text{aigua}}$ (Pa·s)		0,001
$\varnothing_{\text{part}}$ (m)		$300 \cdot 10^{-6}$
Àrea secció Gd (m <sup>2</sup> )		0,000469119
Amplada (m)		0,011
L (m)		0,08
Àrea transversal mitjana (m <sup>2</sup> )	$\dot{A}rea\ trans = \frac{\dot{A}rea\ secció\ Gd \cdot L}{Amplada}$	0,03411774545
$\dot{m}$ (kg/s)		0,02
$\dot{V}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\dot{V} = \dot{m} \cdot \rho_{\text{aigua}}$	0,00002
g (m/s <sup>2</sup> )		9,81
$v_f$ (m/s)	$v_f = \frac{\dot{V}}{\dot{A}rea\ trans}$	0,0005862
$\alpha$		0,35
Re	$Re = \frac{\psi \cdot \varnothing_{\text{part}} \cdot v_f \cdot \rho}{\mu_{\text{aigua}}}$	0,175862
Ra	$Ra = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt[3]{Re}}$	141,8256301
$h_{\text{filtre}}$ (mca)	$h_{\text{filtre}} = \frac{1,067 \cdot Ra \cdot L \cdot v_f^2}{\psi \cdot \alpha^4 \cdot \varnothing_{\text{part}} \cdot g}$	0,0942
$h_{\text{oper}}$ (mca)		0,5
$h_{\text{total}}$	$h_{\text{total}} = (h_{\text{oper}} + h_{\text{filtre}})$	0,5942
$P_b$ útil (w)	$P_b\ \dot{u}til = \rho \cdot g \cdot (8\dot{V}) \cdot h_{\text{total}}$	0,9327
$\eta$		0,75
$P_b$ (w)	$P_b = \frac{P_b\ \dot{u}til}{\eta}$	1,24

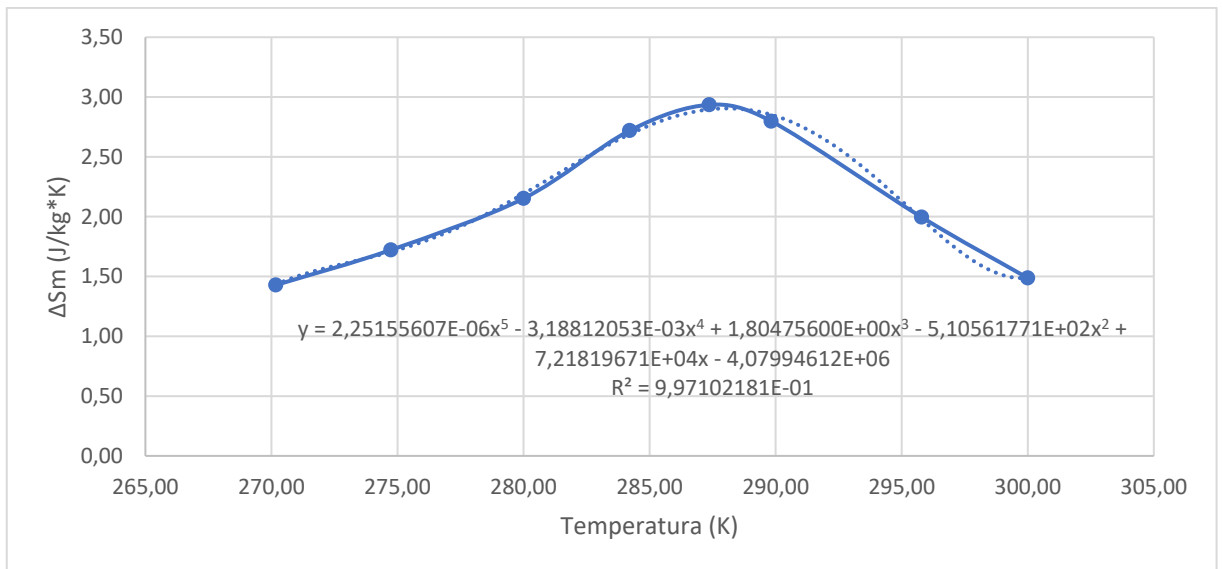
Taula 17: Taula de càlcul i resultats de la potència de la bomba. Elaboració pròpia.



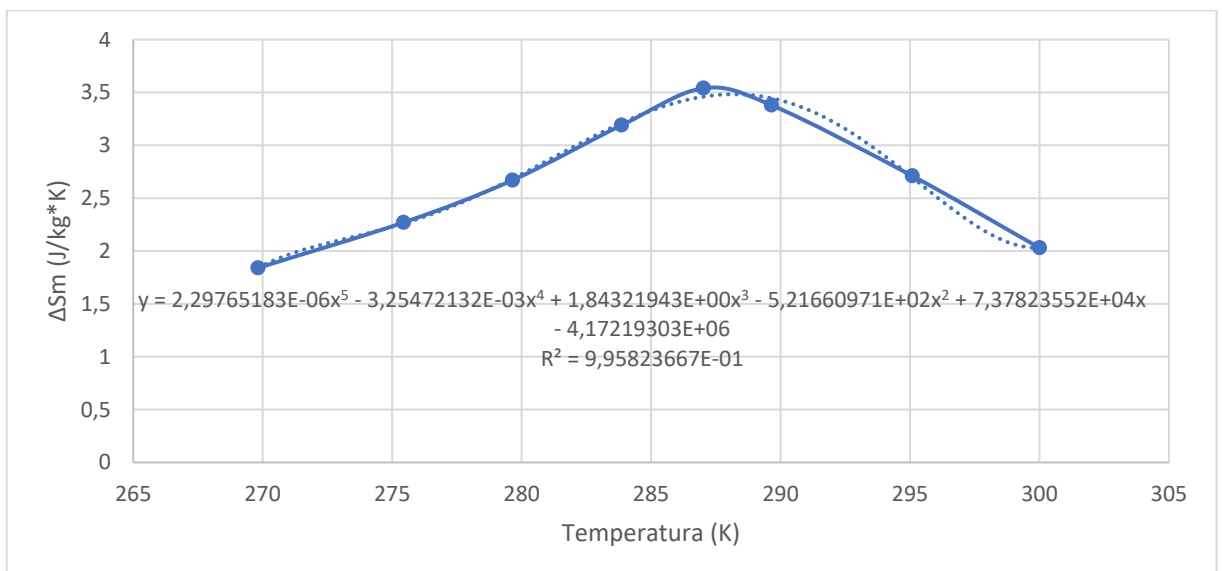
## ANNEX E: CÀLCUL DE LA CAPACITAT DE REFRIGERACIÓ

El càlcul de potència de refrigeració requereix integrar la funció  $\Delta S_M$  i així obtenir un valor amb el qual es pugui calcular el COP.

Per tal de calcular RC mitjançant la integració de la funció  $\Delta S_M$  s'ha agafat diferents valors, entre 270 i 300 K, d'una gràfica de Huang et al.(2019), on hi ha diferents funcions per camps magnètics diferents entre 0,25 i 1,5 T del Gd, i s'han fet una regressió polinòmica de cinquè grau en ambdós casos permetent el càlcul de la integral posteriorment.



Gràfica 4: Regressió polinòmica de cinquè grau a partir de la corba 1T del Gd. Elaboració pròpia.



Gràfica 5: Regressió polinòmica de cinquè grau a partir de la corba 1,25T del Gd. Elaboració pròpia.



## ANNEX F: PRESSUPOST

En la realització del pressupost s'han comptabilitzat les diferents partides.

<b>Quantitat</b>	<b>Descripció</b>	<b>Preu Unitari</b>	<b>Import</b>
125	Adquisició coneixement previ	4	500
140	Recerca de coneixement nou	20	2.800
60	Redacció del document	12	720
50	Disseny prototip conceptual	25	1.250
50	Utilització i amortització de software	30	1.500
375	Amortització d'equips informàtics	2	750
		Total sense IVA	7.520€
		IVA 21%	1.579,20€
		<b>TOTAL</b>	<b>9.099,20 €</b>