

Treball final de grau

Estudi: Doble titulació GETI - ADE

Títol: Estudi i implementació de la refrigeració magnètica en ANSYS.

Document: Memòria

Alumne: Joel Alayo Vargas Machuca

Tutor: Joan J. Suñol Martínez / Lino Montoro Moreno

Departament: Física / Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

Àrea: Física aplicada / Màquines i motors tèrmics

Convocatòria: Febrer 2021

*“My life amounts to no more than one drop in a limitless ocean.
Yet what is any ocean, but a multitude of drops?”*

- David Mitchell.

Agraïments:

Aquest treball no hagués estat possible sense el suport de la meva família, els meus amics i els meus tutors.

Agrair en primer lloc als meus pares, Ynes i Carles, per tota la paciència i suport que m'han donat quan he intentat llençar la tovallola tantes vegades.

Als meus amics que, cadascun a la seva manera, m'han fet veure els meus errors, m'han distret quan ho necessitava i m'han fet treballar quan calia.

I finalment, al meus tutors per guiar-me en aquest tema, donant-me suport i seguiment setmanal.

Índex

Índex figures	III
Índex de gràfiques	V
Nomenclatura	VII
1. Resum.....	1
2. Introducció del treball de fi de grau (TFG)	2
2.1. Antecedents.....	2
2.2. Objecte d'estudi.....	2
2.3. Especificacions i abast	2
3. Introducció a la refrigeració magnètica	4
3.1. Situació actual	4
3.2. Història	7
3.3. Sistemes de refrigeració convencional.....	9
4. La termodinàmica de l'Efecte Magnetocalòric (EMC)	11
5. Sistemes de refrigeració magnètica.....	14
5.1. Cicles de refrigeració magnètica.....	15
5.2. Materials magnetocalòrics (MMC)	18
5.3. Fonts de camp magnètic.....	24
5.4. Avaluació del rendiment.....	26
6. Regenerador Magnètic Actiu (AMR).....	28
7. Models numèrics	35
7.1. Equacions de govern del HTF	36
7.2. Equacions de govern del regenerador	36
7.2.1. Model 1: (Ezan, et al., 2017) modificat.....	37
7.2.2. Model 2: (Ezan, et al., 2017) modificat aplicat en un període de temps	38
7.2.3. Model 3: (Petersen, et al., 2008).....	39

7.2.4.	Model 4: (Bouchard, Nesreddine, & Galanis, 2009) i (Ezan, et al., 2017).....	40
7.3.	Comparació dels resultats numèrics	41
8.	Refrigeració magnètica en ANSYS Fluent	46
1.	49
8.1.	Prototip basat en (Bahl, Petersen, Pryds, & Smith, 2008)	49
8.2.	Mallat amb ANSYS Fluent	51
8.2.1.	Capa límit dinàmica	51
8.2.2.	Capa límit tèrmica	52
8.2.3.	ANSYS Meshing	52
8.3.	Inicialització en ANSYS Fluent.....	56
8.4.	Condicions de contorn	57
8.5.	Desmagnetització del material	59
8.6.	Resultats pels dos prototips	61
9.	Conclusions.....	68
10.	Bibliografia	69

Índex figures

Figura 1: Consum global d'electricitat del sector de la refrigeració en comparació els consum dels altres sectors.....	4
Figura 2: Analogia entre un cicle de gas convencional (4 fases superiors) i un cicle magnetocalòric (4 fases inferiors) de refrigeració.....	9
Figura 3: Diagrames T-S i P-V per un cicle de gas convencional (2 diagrames superiors) i diagrames T-S i H-M per un cicle magnetocalòric (2 diagrames inferiors).....	10
Figura 4: Sistema de font magnètica format per NbFeB i un material magnètic tou, per moviments lineals.	24
Figura 5: Sistema de font magnètica format per NbFeB i un material magnètic tou, per moviments lineals	24
Figura 6: Dos imants Halbach concèntrics per moviments lineals.....	24
Figura 7: Esquema del funcionament d'un cicle AMR basat en el cicle Brayton per dispositius de desplaçament lineal.....	29
Figura 8: "Packed-bed"	33
Figura 9: Estructures ordenades.....	34
Figura 10: Capa límit dinàmica amb un Reynolds creixent.....	51
Figura 11: Geometria i mallat en vista isomètrica del prototip 1 en ANSYS Fluent.....	53
Figura 12: Perspectiva normal al eix $+x$ del prototip 1 per aclaris el factor Bias	54
Figura 13: Geometria i mallat en vista isomètrica del prototip 2 en ANSYS Fluent.....	54
Figura 14: Perspectiva normal al eix $+x$ del prototip 2 per aclaris el factor Bias	55
Figura 15: Informació dels processadors que s'han utilitzar per la simulació dels prototips 1 i 2	56
Figura 16: Valors de la comprovació del mallat en ANSYS Fluent	56
Figura 17: Valor de la qualitat del mallat en ANSYS Fluent.....	56
Figura 18: Representació de les dimensions en els seus eixos i la orientació del camp	59
Figura 19: Equació per el càlcul del factor de desmagnetització adreçat com Dz	59
Figura 20: Perfil de temperatura després de la magnetització instantània.....	61

Figura 21: Perfil de temperatura quan un equilibri tèrmic.	62
Figura 22: Perfil de temperatura als 0.2 segons d'haver començat el bufat.....	62
Figura 23: Perfil de temperatura quan acaba el període de bufat en fred.....	63
Figura 24: Perfil de temperatura un cop acabat la desmagnetització instantània	63
Figura 25: Perfil de temperatura per el final del primer cicle.....	64
Figura 26: Perfil de temperatura per final del cicle 44.	64
Figura 27: Representació de l'UDMI(1), és a dir, de la ΔT_{ad} a l'inici del cicle.	65
Figura 28: Representació de l'UDMI(1), és a dir, de la ΔT_{ad} després de la magnetització instantània	65
Figura 29: Representació del perfil de temperatura després de la magnetització instantània.	66
Figura 30: Representació del perfil de la temperatura un cop acabat el període de bufat en fred i la desmagnetització instantània	66
Figura 31: Calor específica del regenerador, HTF i CHEX.....	67

Índex de gràfiques

Gràfica 1: Demanda global d'energia en les llars	5
Gràfica 2: Representació del principi termodinàmic de l'EMC	12
Gràfica 3: Diagrama T-S d'un cicle de Carnot d'un refrigeració magnètica	15
Gràfica 4: Diagrama T-S d'un cicle Brayton d'un sistema de refrigeració magnètica.....	16
Gràfica 5: Diagrama T-S d'un cicle Ericsson d'un sistema de refrigeració magnètica.	16
Gràfica 6: Diagrama T-S d'una cascada de cicles Ericsson d'un sistema de refrigeració magnètica	17
Gràfica 7: Diagrama T-S d'un AMR basat en un cicle de Brayton	17
Gràfica 8: Comparació de dos exemples de materials de diferent ordre de transició. Primera gràfica representa el diagrama M-T i la segona gràfica representa el diagrama ΔS_m -T	18
Gràfica 9: Exemples de diagrames de M-T i ΔS_m -T per diferents intensitats de camp magnètic (línia sòlida negra representa l'estat amb intensitat de camp magnètic nul·la) pel cas de transformacions de primer ordre	19
Gràfica 10: Exemples de diagrames de M-T i ΔS_m -T per diferents intensitats de camp magnètic (línia sòlida negra representa l'estat amb intensitat de camp magnètic nul·la) pel cas de transformacions de segon ordre	20
Gràfica 11: Perfil de temperatura en la direcció de flux a l'inici del cicle.....	31
Gràfica 12: Perfil de temperatura en la direcció de flux després de la magnetització adiabàtica	32
Gràfica 13: Perfil de temperatura en la direcció de flux al final de la fase de bufat en fred ...	32
Gràfica 14: Perfil de temperatura en la direcció de flux al final de la desmagnetització adiabàtica	33
Gràfica 15: Perfil de temperatura en la direcció de flux al final de la fase de bufat en calent.	33
Gràfica 16: Dos diagrames de EMC-T del resultats dels models numèrics per camps de 1 i 5 T aplicats.	42
Gràfica 17: Entropia magnètica calculada i l'extreta de (Ezan, et al., 2017).	42
Gràfica 18: Diferència d'entropia magnètica calculada i l'extreta de (Ezan, et al., 2017).....	43

Gràfica 19: Dades numèriques calculades per un camp aplicat de 2T i dades experimentals.	43
Gràfica 20: Comparació de la calor específica entre els valors obtinguts i esperats per (Petersen, et al., 2008) sotmès a un camp aplicat de 1T.....	44
Gràfica 21: Diagrama de calor específica respecte la temperatura per cada model i l'experimental sotmès a un camp magnètic 2T	45
Gràfica 22: Representació d'un regenerador de N plaques paral·leles.	46
Gràfica 23: Simplificació de la geometria per la repetició del model en el eix y	46
Gràfica 24: Simplificació de la geometria per simetria de l'ANSYS Fluent.....	47
Gràfica 25: Dispositiu experimental.....	49
Gràfica 26: Esquema de la secció transversal del dispositiu. El nombres fan referència als termoparells	49
Gràfica 27: Geometria a aplicar en el model	49
Gràfica 28: Diagrama del B i v	50
Gràfica 29: Dependència del camp magnètic intern amb la temperatura, sotmès a un camp magnètic 1.1T	60

Nomenclatura

B	Densitat de flux magnètica (T)
B_r	Densitat de flux magnètic romanent (T)
H	Camp magnètic (A/m)
H_a	Camp magnètic aplicat (A/m)
H_c	Coercivitat intrínseca (A/m)
H_d	Camp de desmagnetització (A/m)
H_e	Camp magnètic en l'obertura d'aire (A/m)
H_{int}	Camp magnètic intern (A/m)
M	Magnetització (A/m)
N_d	Factor de desmagnetització (-)
T	Temperatura (K)
T_c	Temperatura de Curie (K)
T_D	Temperatura de Debye (K)
ΔT_{ad}	Diferència de temperatura adiabàtica (K)
w_m	Energia magnètica (J/m^3)
f	Freqüència de cicle (Hz)
t	Temps (s)
S	Entropia total específica ($J/kg \cdot K$)
S_m	Entropia magnètica específica ($J/kg \cdot K$)
S_l	Entropia de xarxa específica ($J/kg \cdot K$)

S_e	Entropia elèctrica específica (J/kg·K)
ε	Porositat (-)
α	Difusivitat tèrmica (m ² /s)
ρ	Densitat (kg/m ³)
μ	Viscositat (kg/m·s)
k	Conductivitat tèrmica (W/m·K)
Pr	Nombre de Prandtl (-)
Re	Nombre de Reynolds (-)
Nu	Nombre de Nusselt (-)
R_u	Constant universal dels gasos (8.31434 J/mol·K)
μ_B	Magneton de Bohr ($9.2740154 \cdot 10^{-24}$ J/T)
μ_0	Permeabilitat en el buit ($4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A ²)
N_A	Nombre d'Avogadro ($6.023 \cdot 10^{23}$ mols ⁻¹)
k_B	Constant de Boltzmann ($1.380662 \cdot 10^{-23}$ J/kg)
c_p	Calor específica (J/kg·K)
J	Nombre quàntic de moment angular total (\hbar)
g	Factor de Landé (-)
γ_e	Constant de Sommerfeld (J/kg·K ²)
N	Nombre d'àtoms per unitat de massa (kg ⁻¹)
N_s	Nombre de spins magnètics per unitat de massa (kg ⁻¹)
P	Pressió (Pa)

σ	Magnetització específica (A/m ² ·kg)
v	Velocitat (m/s)
y_p	Distància entre la interfície i el centra de la cel·la adjacent del fluid (m)
v_∞	Velocitat lliure màxima (m/s)
x	Distància en el sentit del flux des de l'inici de la capa límit

1. Resum

Aquest treball, estudia i implementa un sistema de refrigeració magnètica a temperatura ambient fent servir ANSYS pel disseny i l'optimització. S'ha verificat el model a partir de les dades experimentals de (Bahl, Petersen, Pryds, & Smith, 2008), i per la modelització en ANSYS Fluent s'ha utilitzat com a guia l'article (Ezan, et al., 2017), s'ha proposat un model per tal d'obtenir un efecte magnetocalòric progressiu. Finalment, s'ha arribat a un model que s'aproxima millor als resultats experimentals gràcies a una correcció en la calor específica i a tenir en compte altres pèrdues com la desmagnetització. Però no s'ha assolit l'objectiu de realitzar diferents simulacions variant els paràmetres d'entrada per trobar un punt òptim del sistema de refrigeració magnètica.

Paraules clau: Refrigeració magnètica; Efecte magnetocalòric (EMC); Simulació numèrica; Regenerador magnètic actiu (ARM).

2. Introducció del treball de fi de grau (TFG)

Aquest treball està dividit en dos parts fonamentals. La primera fa referència la recerca realitzada per l'estudi dels sistemes magnetocalòrics, conèixer els fonaments en els quals es basa i que posteriorment es faran servir per la implementació en ANSYS. La segona part consta de l'estudi electromagnètic dels materials magnètics i la implementació de l'efecte magnetocalòric, així com la simulació d'un sistema de refrigeració en ANSYS Fluent.

2.1. Antecedents

A data del treball, s'han publicat diversos models numèrics per l'estudi dels sistemes de refrigeració; d'aquests, pocs s'han implementat en programes de simulació CFD comercials, la gran majoria en *COMSOL Multiphysics* i *OpenFOAM*. Només es té constància d'un parell d'articles que van fer servir el software ANSYS Fluent; en concret, s'ha seguit el treball de (Ezan, et al., 2017).

2.2. Objecte d'estudi

La raó d'aquest treball és la implantació dels components que caracteritzen un sistema de refrigeració magnètica en un software per simular, estudiar i optimitzar aquest sistema. En aquest cas, el software que s'ha utilitzat és l'ANSYS, més concretament per la introducció de l'efecte magnetocalòric i l'estudi d'intercanvi de calor amb el fluid s'ha utilitzat l'ANSYS Fluent.

2.3. Especificacions i abast

El treball actual no busca proposar un sistema nou de refrigeració magnètica, sinó fer servir els sistemes ja existents i estudiats prèviament en publicacions científiques que es trobaran a la bibliografia.

El sistema inclourà la implementació del material magnetocalòric, el fluid de transferència de calor i l'imant. La resta de components que normalment estan inclosos, com les bombes, vàlvules, canonades, sistemes de mesura, pistons o sistemes d'engranatges, proporcionar el moviment de l'imant o el material magnetocalòric,... quedaran fora del marc de treball. Pel cas dels intercanviadors de calor, s'implementarà als extrems del material magnetocalòric com a

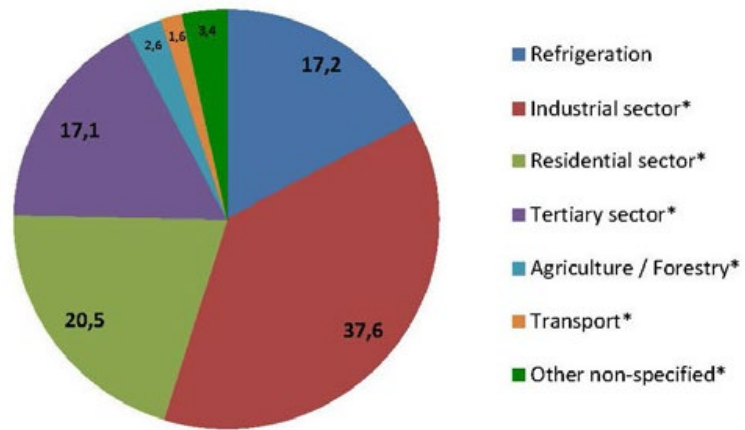
condicions de contorn per garantir el funcionament del sistema, però sense profunditzar en el seu disseny.

El modelatge numèric implica la termodinàmica, transferència de calor, fluidomecànica i física de l'estat sòlid. El rendiment depèn fortament de diferents factors de funcionament: factor d'utilització, freqüència de treball, canvi del camp magnètic, fluid de treball, cicle termodinàmic, material magnetocalòric i la seva geometria.

3. Introducció a la refrigeració magnètica

3.1. Situació actual

Avui en dia, el 17,2% de l'energia elèctrica produïda mundialment esta destinada a la producció de fred (refrigeració i aire condicionat), i per donar abast a aquesta demanda, s'utilitza un sistema de refrigeració convencional format per cicles de compressió i expansió d'un refrigerant. Aquesta tecnologia versàtil va tenir el seus inicis a mitjans del segle XIX a Gran Bretanya, i va ser potenciada degut a les exigències que marcava l'industria adaptant-se a diferents camps (frigorífics, aire condicionat, liquidadors, etc.).



* Refrigeration sector consumption excluded

Figura 1: Consum global d'electricitat del sector de la refrigeració en comparació els consum dels altres sectors (* Sense tenir en compte el consum per la refrigeració). Font: (Coulomb, Dupont, & Pichard, 2015)

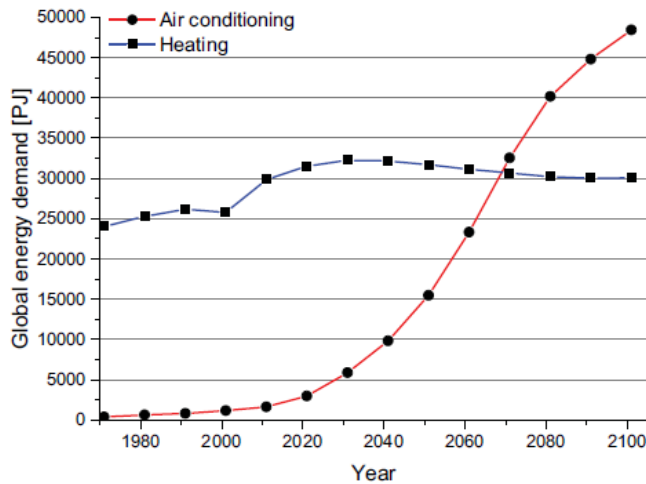
Com totes les tecnologies, després d'un creixement sostingut en la millora del seu rendiment, cada cop costava més superar les millores anteriors, assolint una nova etapa: la maduració. A més presenten una estructura de costos de producció i manteniment optimitzats.

Malgrat tot, aquests sistemes presenten certes irreversibilitats, que es traduiran en pèrdues energètiques importants. A més, aquest sistema treballa amb refrigerants que cada cop son més castigades pels acords entre països per reduir el seu efecte perjudicial sobre el medi ambient¹:

- CFC (Clorofluorocarbonis): aquests refrigerants ja son retirats del mercat.
- HCFC (Hidro-cloro-fluorocarbonis): estan en procés de retirada del mercat. Aquests eren utilitzats a gran escala, i per les noves mesures han sigut reemplaçats pels HFC.
- HFC (Hidro-fluorocarbonis): tenen un gran impacte ambiental i s'està considerant retirar-ne alguns del mercat.

¹ Protocol de Montreal (1987). Protocol de Kioto (1997).

En son un exemple les mesures aprovades per la Unió Europea que entren en vigor aquest any 2020 i prohibeixen els gasos amb PCA² igual o superior a 2500, i mesures més estrictes es preveuen a l'any 2022.



Gràfica 1: Demanda global d'energia en les llars. Font: *The Resource Basis of Magnetic Refrigeration* (2016).

Es presenten diferents alternatives per superar les noves restriccions ambientals i de eficiència.

Es presenten diferents alternatives per superar les noves restriccions ambientals i de eficiència.

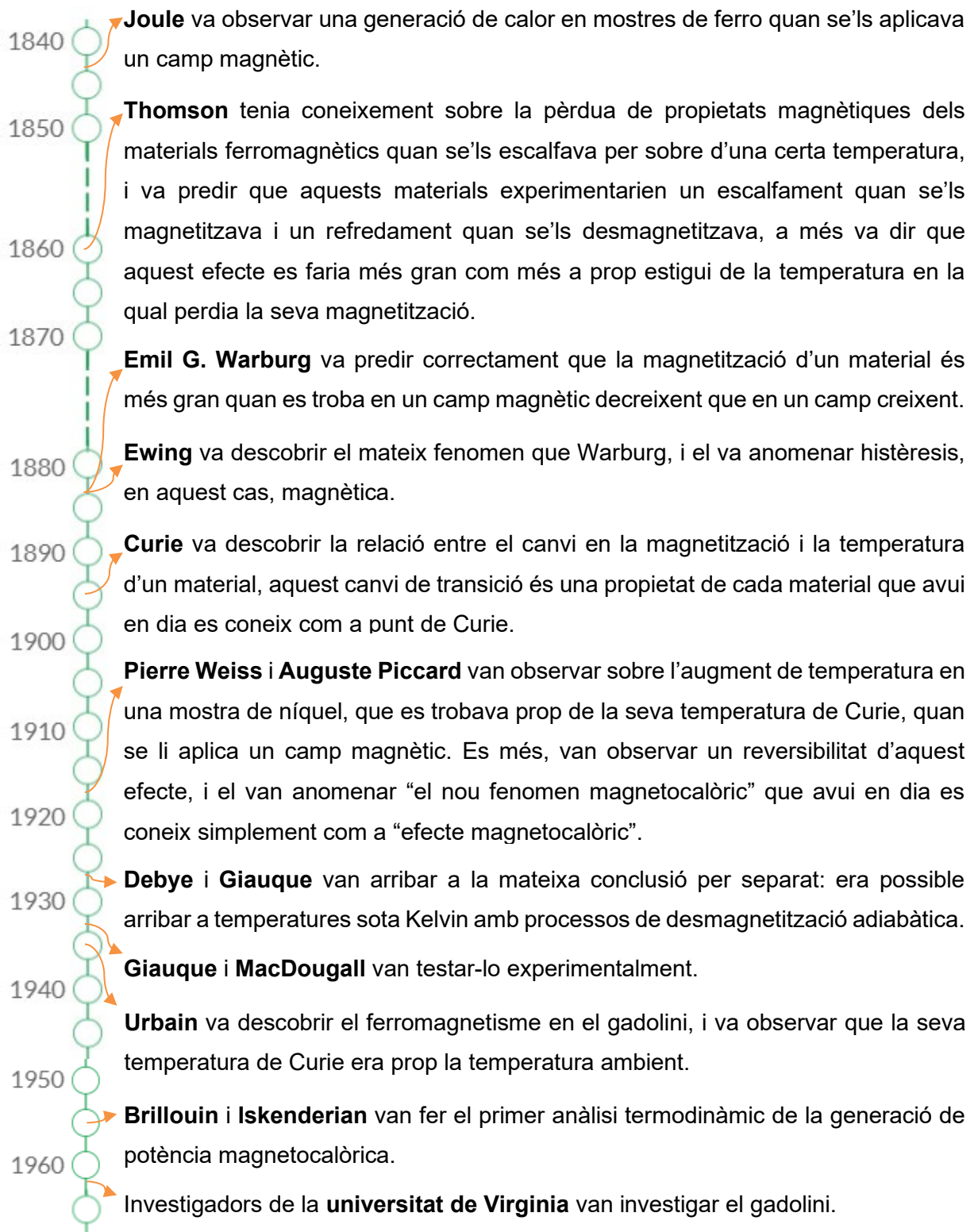
- Una opció és canviar els refrigerants basats en el carboni per l'amoníac (NH_3), altrament anomenat R-717:
 - És un dels gasos més abundants del planeta, s'obté fàcilment, és econòmic, pot absorbir grans quantitats de calor al evaporar-se i, en conseqüència es traduiria en una reducció de la mida de les canonades i altres components per obtenir la mateixa capacitat de refrigeració. A més la pressió de funcionament és molt similar a la d'altres refrigerants.
 - S'ha demostrat ser un refrigerant eficient i apte per aplicacions tant en alta com a baixa temperatura.
 - Però necessita una puresa del 99.98% per ser apte com a refrigerant i, segons la classificació de seguretat dels refrigerants, està catalogat com un B2 (mig grau de ser inflamable i es considera altament tòxic).

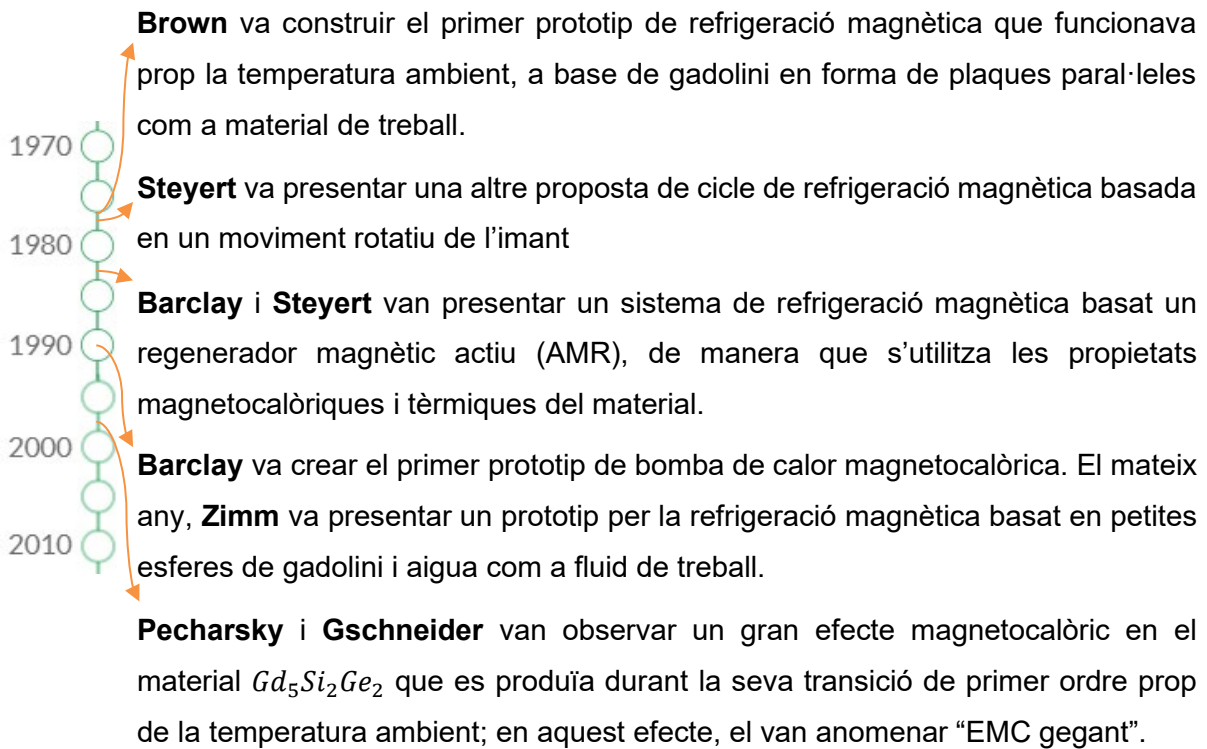
Aquesta opció no és nova, de fet, es porta implantant des de els anys 30 en plantes industrials, en alguns transports o compressors centrífugs industrials. Tot i així, no s'estén més enllà per la seva manca de seguretat.

² "Potencial d'Escalfament Atmosfèric" (PCA) o "Global Warning Potential" (GWP).

- Refrigeració per absorció i adsorció.
- Refrigeració termoelèctrica, termoacústica, electrocalòric, mecanocalòric.
- Refrigeració magnetocalòrica.

3.2. Història





Els primers prototips de sistemes de refrigeració magnètica eren molt robustes, i fent servir imants superconductors permetien arribar a una alta eficiència energètica ja que eren capaços de crear camps magnètics molt alts.

3.3. Sistemes de refrigeració convencional

La tecnologia de compressió de vapor presenta una eficiència energètica al sistemes de refrigeració de gran escala properes al 60% del cicle de Carnot; d'altre banda, pels electrodomèstics a petita escala solen tenir baixes eficiències que ronden el 20% del cicle de Carnot.

El funcionament del cicle de compressió de vapor consisteix de sotmetre un fluid gasós a un procés isentròpic en un compressor, per tal d'augmentar la seva temperatura i pressió fins arribar a la pressió de condensació, d'aquesta manera quan el fluid passa per un intercanviador de calor, anomenat condensador, que es troba en un medi amb una temperatura més baixa, el fluid passarà d'un estat gasós a un estat líquid cedint calor però sense canvi de temperatura, és a dir, un procés isotèrmic. Inversament passarà la següent mitat del cicle, el líquid que surt de del condensador passarà per la vàlvula que sotmetrà el líquid a un procés isentròpic per baixar la seva temperatura, de manera que quan arribi al bescanviador que es troba en un medi amb una temperatura més alta que el fluid, aquest s'evapori a temperatura constant absorbint la calor del medi, i així tancar el cicle.

Per tal de fer aquesta tecnologia comercialitzable, cal continuar treballant en la ciència dels materials i explorar mètodes de transferència de calor eficients i ràpids. Respecte a la creació del camps magnètics, com veurem més endavant, es fan servir imants permanents basats elements rars de la natura.

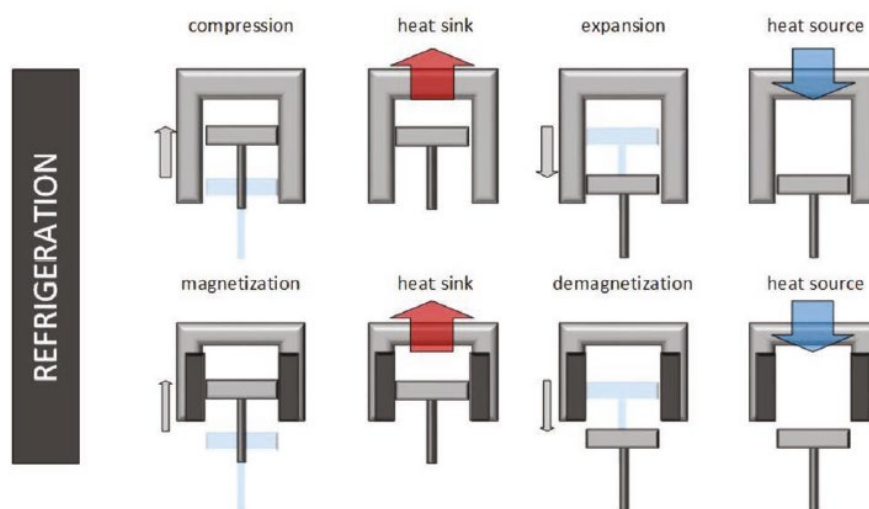


Figura 2: Analogia entre un cicle de gas convencional (4 fases superiors) i un cicle magnetocalòric (4 fases inferiors) de refrigeració. Font: (Kitanovski, *Energy application of magnetocaloric materials*, 2020)

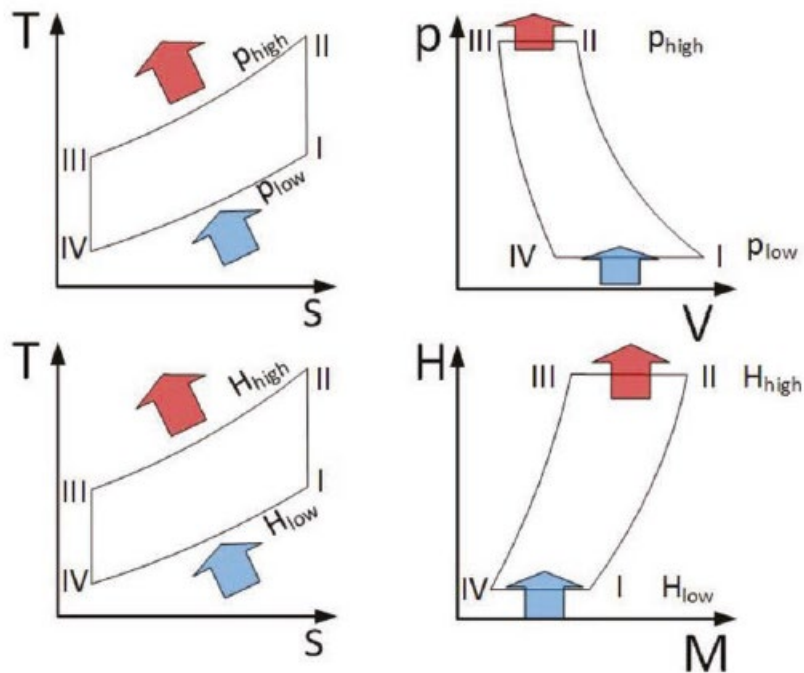


Figura 3: Diagrames T-S i P-V per un cicle de gas convencional (2 diagrames superiors) i diagrames T-S i H-M per un cicle magnetocalòric (2 diagrames inferiors). Font: (Kitanovski, *Energy application of magnetocaloric materials*, 2020)

Les figures 2 i 3 mostren una analogia entre els cicles magnetocalòrics i els cicles de compressió de gas: La magnetització (M) pot considerar-se anàleg al volum (V) i el camp magnètic (H) anàleg a la pressió (P).

4. La termodinàmica de l'Efecte Magnetocalòric (EMC)

L'efecte magnetocalòric (EMC) és fenomen físic propi dels materials magnètics quan es troben sota la influència d'un camp magnètic variable, i es manifesta com una variació de la temperatura o un canvi d'entropia segons les condicions del procés.

L'entropia dels materials ferromagnètics es pot dividir en tres parts:

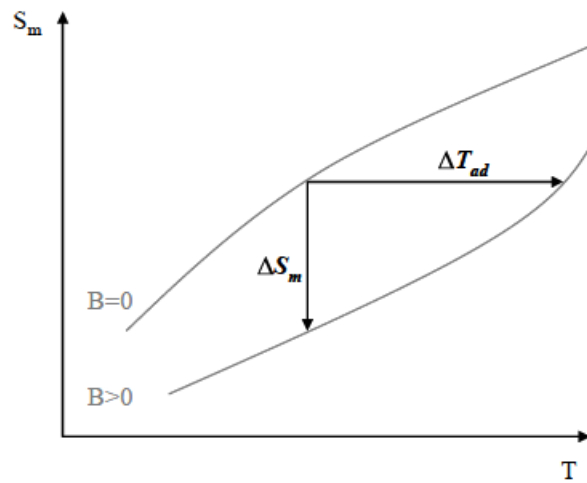
$$S(T, B) = S_m(T, B) + S_l(T) + S_e(T) \quad \text{Eq. 1}$$

- Entropia magnètica (S_m) es caracteritza pels moments magnètics dels propis electrons, per això mostra una forta dependència per B i T.
- Entropia de xarxa (S_l) es caracteritza per la xarxa cristal·lina dels àtoms, molt lligada a la vibració d'aquests, i en conseqüència, a la temperatura T.
- Entropia elèctrica (S_e) es caracteritza per la contribució tèrmica dels electrons en el material.

En absència de camp magnètic, els moments magnètics del material es troben desordenats. Al aplicar un camp magnètic extern, aquests moments magnètics es veuen forçats a alinear-se, passant a un estat més ordenat, i per definició, a un estat de menor entropia.

Diem que l'EMC és directe quan al augmentar el camp magnètic es produeix un escalfament del material, i és invers quan el material es refreda. A partir d'ara, sempre ens referirem a l'EMC directe.

- En condicions isentròpiques (adiabàtiques), la entropia ha de romandre constant. Per tant, el canvi de l'entropia magnètica (ΔS_m) s'ha de compensar amb un canvi de l'entropia de xarxa (ΔS_l), i com a conseqüència, la temperatura del material magnètic augmentarà (ΔT_{ad}).
- En condicions isotèrmiques, per definició, la temperatura T roman constant, fent que la variació d'entropia (ΔS) sigui únicament a causa de la variació de l'entropia magnètica (ΔS_m).



Gràfica 2: Representació del principi termodinàmic de l'EMC. (Legait, 2011)

L'equació de govern que determina el comportament d'un material magnètic sotmès a un camp magnètic és l'entalpia lliure de Gibbs.

$$G(P, B, T) = U + P \cdot V - \vec{M} \cdot \vec{B} - T \cdot S \quad \text{Eq. 2}$$

Considerarem condicions de pressió (P) i volum (V) constants, donat que estan el material de treball esta en estat sòlid, els seus efectes es consideren negligibles.

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial B}\right)_T dB + \left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_B dT \quad \text{Eq. 3}$$

$$dG = M dB - S dT \quad \text{Eq. 4}$$

Relació de Maxwell:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T = \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B \quad \text{Eq. 5}$$

La variació d'entropia relativa al EMC:

$$\Delta S(T, \Delta B) = \Delta S_m(T, \Delta B) = \int_{B_i}^{B_f} \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB = \int_{B_i}^{B_f} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B dB \quad \text{Eq. 6}$$

La capacitat de refrigeració interna és la quantitat d'energia disponible en el material, i ve donada per:

$$P_f = \int_{T_f}^{T_c} \Delta S_m(T, \Delta B) dT \quad \text{Eq. 7}$$

$$dS(T, B) = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B dT + \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \quad \text{Eq. 8}$$

Definició de capacitat específica a pressió i camp magnètic constant:

$$c_{P,B} = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right) \quad \text{Eq. 9}$$

$$dS(T, B) = \frac{c_{P,B}}{T} dT + \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \quad \text{Eq. 10}$$

En condicions adiabàtiques (isentropiques):

$$dS = 0 \rightarrow \frac{c_{P,B}}{T} dT + \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB = 0 \quad \text{Eq. 11}$$

$$dT = -\frac{T}{c_{P,B}} \cdot \left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_T dB \quad \text{Eq. 12}$$

$$\Delta T_{ad} = \int_{B_i}^{B_f} dT = -\int_{B_i}^{B_f} \frac{T}{c_{P,B}(B, T)} \cdot \left(\frac{\partial S(B, T)}{\partial B}\right)_T dB \quad \text{Eq. 13}$$

El diagrama T-S de la gràfica 2 representa la dependència tèrmica de l'entropia per un determinat sistema magnètic i un camp magnètic aplicat.

5. Sistemes de refrigeració magnètica

A grans trets, els elements bàsics pel funcionament d'un sistema de refrigeració magnètica son:

- Material magnetocalòric, l'element més estudiat és el gadolini (Gd).
- El fluid de transferència de calor (HTF³). Generalment s'utilitza aigua amb inhibidors per evitar l'oxidació del gadolini. Oscil·la en sincronia amb la magnetització i desmagnetització periòdica.
- Un sistema per produir un camp magnètic. S'ha demostrat que el més eficient son els imants permanents Halbach.
- Un intercanviador de calor en el focus fred (on el HTF absorbeix la calor Q_f) i un intercanviador de calor en el focus calent (on el HTF desprèn la calor Q_c).
- Bomba hidràulica que impulsa el fluid i també connecta la matriu de regeneració amb la font de calor externa i els intercanviadors de calor del dissipador de calor.

Si revertim el cicle de refrigeració magnetocalòric obtenim una generació d'energia magnetocalòrica.

³ "Heat Transfer Fluid"

5.1. Cicles de refrigeració magnètica

En termes generals, el material de treball (refrigerant) absorbeix la calor de la càrrega en la zona freda (intercanviador de calor en el focus fred) i la porta a la zona calent (intercanviador de calor en el focus calent). Després d'uns cicles s'arriba a un estat estacionari on la càrrega es refreda.

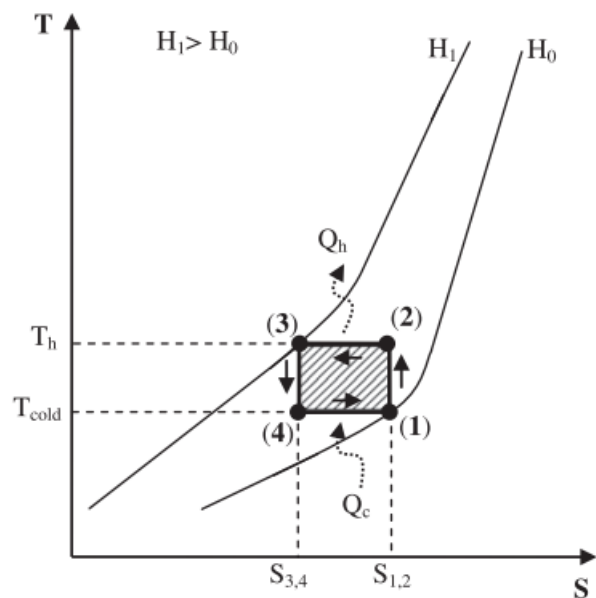
En el cas del refrigeradors magnètic, el material de treball és el material magnetocalòric, que canvia la seva entropia o temperatura sota la presència d'un camp magnètic.

Processos termodinàmics:

- Magnetització isotèrmica: durant aquest procés l'efecte magnetocalòric es manifesta com una variació d'entropia.
- Magnetització adiabàtica: en aquest cas, l'efecte magnetocalòric es manifesta com una variació de temperatura perquè no hi ha intercanvi de calor.
- Processos isomagnètics: on no hi ha variació del camp magnètic.

Cicles termodinàmics:

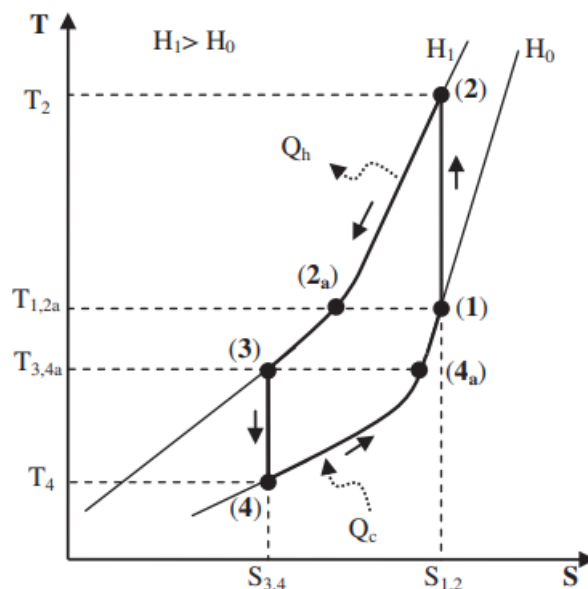
- **Cicle de Carnot:** només s'utilitza per definir l'eficiència dels altres cicles, considerant aquest com a ideal.
 - ⊗ (1) → (2): Magnetització adiabàtica: el material magnètic és parcialment magnetitzat en un procés adiabàtic, per tal de incrementar de T_{cold} a T_{hot} .
 - ⊗ (2) → (3): Magnetització isotèrmica: s'acaba arribant al camp magnètic màxim (H_1), eliminant la calor generada fent passar un fluid (HTF) més fred que el refrigerant.
 - ⊗ (3) → (4): Desmagnetització adiabàtica: per reduir la temperatura de T_{hot} a T_{cold} .
 - ⊗ (4) → (1): Desmagnetització isotèrmica: s'acaba arribant al camp magnètic mínim (H_0), fent passar un fluid més calent que el refrigerant perquè aquest últim no variï la seva temperatura. I tornem a l'estat inicial.



Gràfica 3: Diagrama T-S d'un cicle de Carnot d'un refrigeració magnètica. Font: J. Romero Gómez (2013).

■ **Cicle de Brayton:** La transferència de calor es realitza mantenint constant la intensitat del camp magnètic, per tal d'obtenir uns rangs de temperatures més elevades, i en conseqüència, una transferència de calor entre el fluid i el material magnetocalòric més elevat.

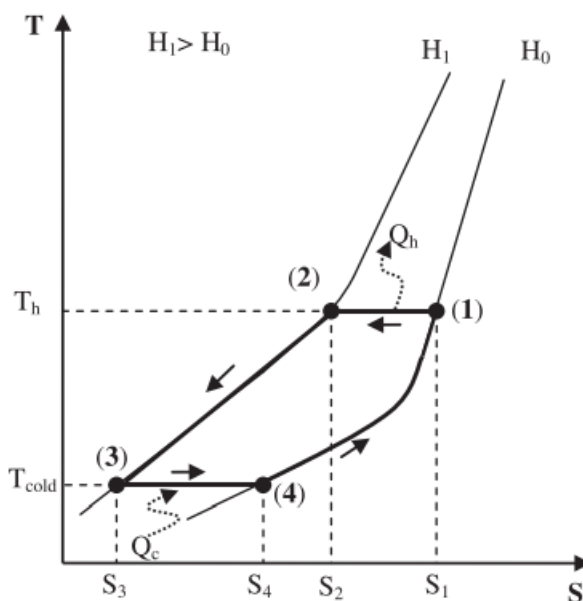
- ❁ (1) → (2): Procés de magnetització adiabàtica, per manifestar l'efecte magnetocalòric com una ΔT_{ad} .
- ❁ (2) → (3): Refredament isomagnètic: un cop sotmès a la màxima intensitat magnètica (H_1), es fa passar un fluid (Q_{hot}) més fred que el regenerador per tal de baixar la temperatura fins a $T_{1,2a}$.
- ❁ (3) → (4): Procés de desmagnetització adiabàtica, per reduir la temperatura fins a T_4 .
- ❁ (4) → (1): Escalfament isomagnètic: el material magnètic absorbeix calor amb el fluid (Q_{cold}) fins arribar a $T_{3,4a}$.



Gràfica 4: Diagrama T-S d'un cicle Brayton d'un sistema de refrigeració magnètica. Font: J. Romero Gómez (2013).

■ **Cicle de Ericsson**

- ❁ (1) → (2): procés de magnetització isotèrmica, per que el calor produït per l'efecte magnetocalòric sigui absorbit per el fluid de transport de calor.
- ❁ (2) → (3): un cop arribat al màxim de intensitat magnètica, es continua passant fluid del focus calent, per tal de refredar el regenerador.
- ❁ (3) → (4): procés de desmagnetització isotèrmica, en el qual absorbeix la calor del focus fred a través del fluid, d'aquesta manera no hi ha variació de temperatura en el regenerador.



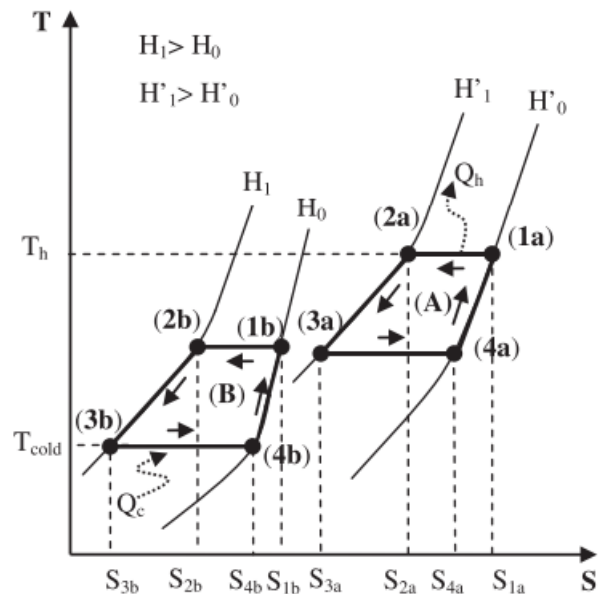
Gràfica 5: Diagrama T-S d'un cicle Ericsson d'un sistema de refrigeració magnètica. Font: J. Romero Gómez (2013).

❁ (4) → (1): continua passant fluid provinent del focus fred, que es troba a més temperatura que el regenerador, i consegüentment, incrementa la seva temperatura fins arribar al inici del cycle.

- Cascada de cicles magnètics: consta de diferents materials magnètics, cadascun amb una T_c diferent, d'aquesta manera la eficiència augmenta i pot treballar amb un rang de temperatures superior.

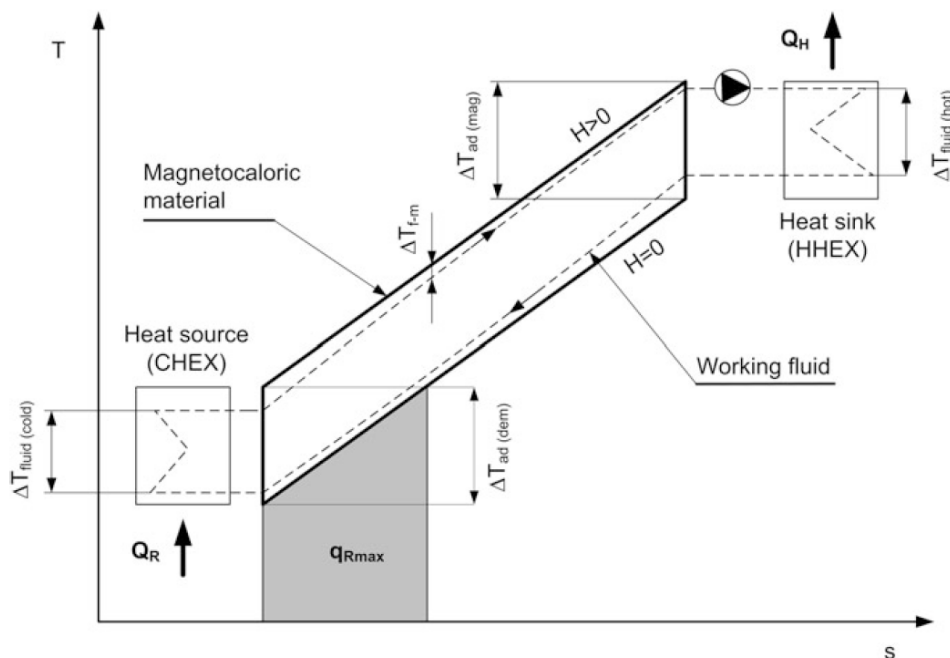
La figura mostra l'exemple amb dos cicles Ericsson on el cycle A s'encarrega d'expulsar el calor al focus calent, i el cycle B d'absorbir calor del focus fred.

- Cycle del Regenerador Magnètic Actiu (AMR)



La principal diferencia entre cycle cascada i el AMR, es que en aquest últim totes les parts del AMR absorbeixen o cedeixen calor simultàniament al fluid de transferència de calor (HTF).

Gràfica 6: Diagrama T-S d'una cascada de cicles Ericsson d'un sistema de refrigeració magnètica. Font: J. Romero Gómez (2013).



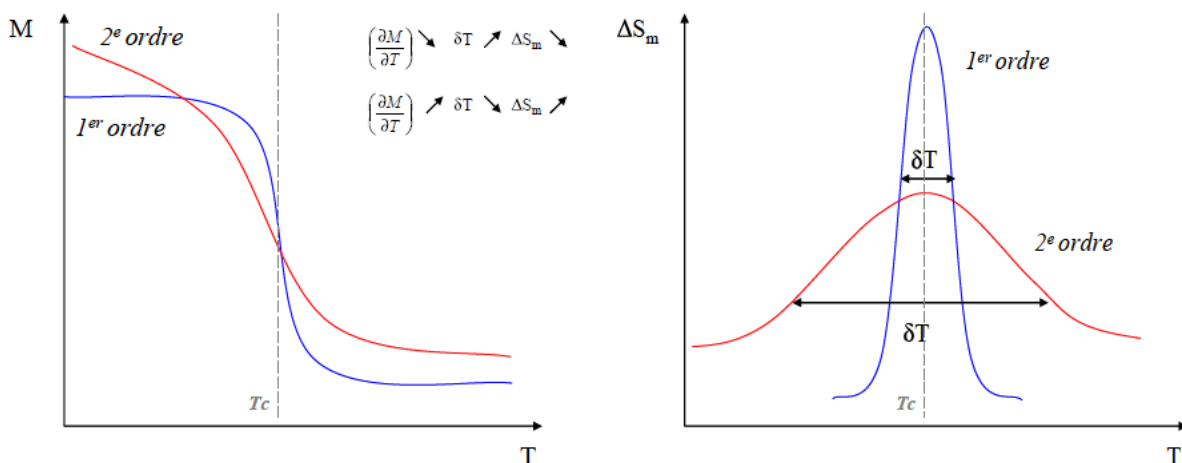
Gràfica 7: Diagrama T-S d'un AMR basat en un cycle de Brayton. Font: (Kitanovski, et al., 2014)

5.2. Materials magnetocalòrics (MMC)

Tots els materials magnètics exhibeixen l'efecte magnetocalòric quan se'ls aplica en un canvi de camp magnètic, però normalment quan de parlem refrigeració magnètica se'ls anomena com materials magnetocalòrics o materials de treball.

S'anomena transició o canvi de fase quan un material a una certa temperatura passa d'una fase a una altre, i en conseqüència es produeix un canvi en les propietats del material. En concret, els materials magnètics presenten una transició magnètica, és a dir, perden la seva magnetització espontània (canvi en l'ordre en la disposició del moments magnètics dels electrons) per sobre la temperatura de transició, que en aquest cas correspon a la temperatura de Curie (T_C).

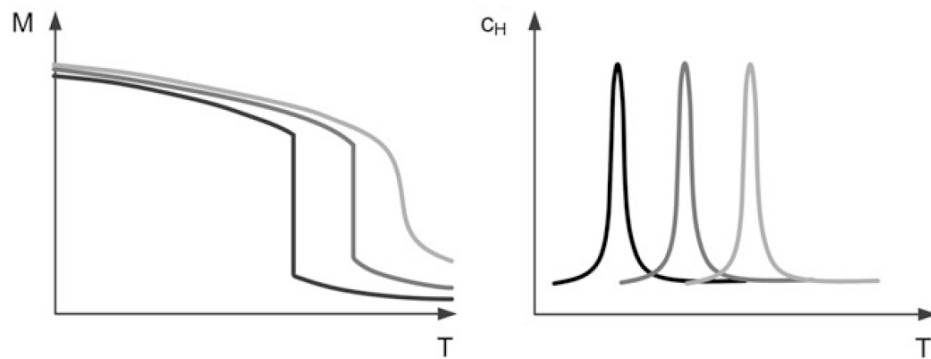
Els MMC es poden classificar segons el tipus de transició que pateixen:



Gràfica 8: Comparació de dos exemples de materials de diferent ordre de transició. Primera gràfica representa el diagrama M-T i la segona gràfica representa el diagrama ΔS_m -T. Font: (Kitanovski, et al., 2014)

➤ Transicions de primer ordre.

En aquest tipus de transformació, les dues fases es troben en equilibri, i per això no es produeix una transformació instantània. Presenten discontinuïtats en el volum, en la magnetització i l'entropia en la temperatura de transició, principalment perquè no només hi ha una transició magnètica, sinó també estructural, i en conseqüència presenten un efecte magnetocalòric més alt.



Gràfica 9: Exemples de diagrames de M-T i ΔS_m -T per diferents intensitats de camp magnètic (línia sòlida negra representa l'estat amb intensitat de camp magnètic nul·la) pel cas de transformacions de primer ordre. Font: (Kitanovski, et al., 2014)

Ahora presenten certs inconvenients:

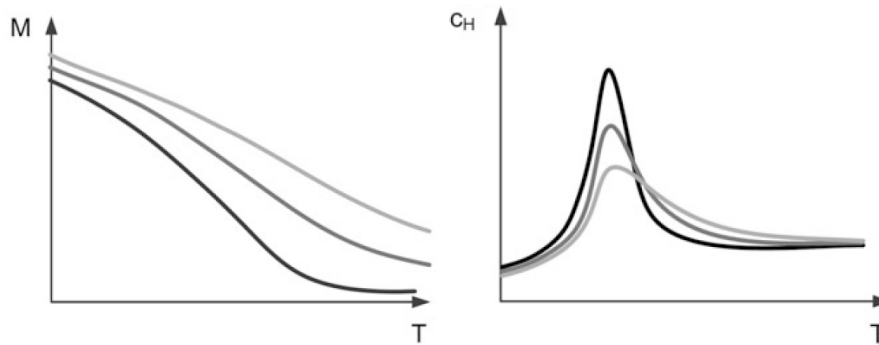
- Tenen una histèresis tèrmica i magnètica.
- Canvis en el volum i en les propietats tèrmiques importants entre les fases existents, que acaben provocant esforços en l'estructura.
- Rang de temperatura on es produeix el canvi abrupte d'entropia és petit.
- Estabilitat cíclica: els estudis demostren una duració de 10^8 cicles. Una proposta de millora es introduir la porositat en el material, a costa de disminuir la conductivitat tèrmica.
- Esquerdes durant la seva producció. S'haurien de realitzar més esforços d'investigació per obtenir partícules fines, preferiblement monocristal·lines i de mida uniforme. La fragilitat d'aquests materials es pot millorar-se amb la vinculació d'un polímer o metall.
- Baixa conductivitat tèrmica.

Els materials que presenten aquest tipus de transicions se'ls anomena materials magnetocalòrics gegants.

Els més destacats en els últims anys son: La-Fe-Si-H, La-Fe-Mn-Si-H, La-Fe-Co-Si, Mn-Fe-P-Si.

➤ Transicions de segon ordre.

Aquestes transformacions es caracteritzen per un canvi de continuat d'una fase a l'altre, sense que la coexistència d'aquests dos en equilibri, llavors no presenten discontinuïtats en el volum, magnetització i l'entropia. Pels materials que presenten aquesta transició, el canvi d'entropia augmenta a mesura que augmenta el camp magnètic.



Gràfica 10: Exemples de diagrames de M-T i ΔS_m -T per diferents intensitats de camp magnètic (línia sòlida negra representa l'estat amb intensitat de camp magnètic nul·la) pel cas de transformacions de segon ordre. Font: (Kitanovski, et al., 2014)

Son de segon ordre només quan es produeix el canvi de fase magnètica.

El Gadolini és un exemple, per sota la seva temperatura de Curie és un material ferromagnètic amb un sistema d'espins ordenats, i per sobre d'aquesta temperatura passa a ser un material paramagnètic ja que la vibració d'aquestes molècules no permet la ordenació dels espins.

Respecte al canvi de la temperatura adiabàtica (ΔT_{ad}), el comportament es similar per les dues transicions de fases, ja que incrementa a mesura que augmenta el camp magnètic, amb la diferència que en les transicions de primer ordre es mostra com un pic més accentuat i en un rang de temperatures menor.

Pel disseny de la refrigeració magnètica es tenen en compte els següents criteris per triar el MMC adequat:

- Temperatura de Curie (T_C) prop de la temperatura de treball, per tal de aprofitar el millor possible el notable efecte magnetocalòric que es produeix al voltant d'aquesta temperatura. I baixa temperatura de Debye (T_D).
- Gran quantitat de l'EMC, en especial quan presenten un ΔT_{ad} més gran que un ΔS_m , això es degut a les propietats tèrmiques del material: si el variació d'entropia es gran, augmentarà la capacitat calorífica, és a dir, necessitarem més quantitat de energia per escalfar el material. Recomanable $\Delta T_{ad} > 2 \text{ K/T}$ i $\Delta S_{isotèrmic} > 10 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.
- EMC en un ampli rang de temperatura, això es especialment important en els AMR on al llarg del material (en la direcció de flux del fluid) es troba a diferents temperatures a mesura que van passant el cicles, fins que els extrems del material arribin a temperatures prou allunyades de la T_C i aleshores l'efecte magnetocalòric sigui

pràcticament negligible, en aquestes condicions es diu que s'arriba a un estat estacionari, ja que l'EMC en aquests punts és gairebé zero.

- Histèresis tèrmica (durant l'escalfament i refredament) i magnètica (durant la magnetització i desmagnetització) lo més petita possible, ja que provoquen pèrdues energètiques i empitjoren el rendiment a freqüències elevades, en conseqüència, una major necessitat del treball subministrat. A més, redueix l'eficiència del dispositiu.

- La conductivitat tèrmica i la difusivitat tèrmica del MMC ha de ser lo més gran possible, per tal d'assegurar la resposta tèrmica del material i millorar la transferència de calor entre el MMC i el fluid (HTF).

La conductivitat tèrmica òptima d'un MMC, en estructura de plats paral·lels AMR, està fortament lligada a la longitud del regenerador i la freqüència de treball.

- Alta resistència elèctrica per evitar o reduir el màxim possible les corrents de Foucault generades per les fases de magnetització i desmagnetització, i en conseqüència reduir l'energia dissipada.

Per freqüències baixes, inferiors als 10Hz, l'efecte dels corrents de Foucault són gairebé negligibles. Però per freqüències superiors, té importants efectes en el AMR.

- No tòxic, i preferentment lliure de terres rares.
- Resistent a la corrosió pel fluid de treball (HTF) o, a falta d'aquesta propietat, és convenient l'ús d'inhibidors en el HTF.
- Bones propietats mecàniques, per proporcionar un sistema estable pel funcionament cíclic, facilitar la seva fabricació i evitar la deformació per les forces produïdes durant la magnetització i desmagnetització.
- Baix cost de fabricació.
- Baix impacte ambiental.
- Rang de funcionament comprès en una freqüència entre 1 – 4 Hz i conductivitat tèrmica entre 10 – 30 W/m·K
- Baix cost del material: < 30 €/kg
- Propietats magnetocalòriques adaptables a les condicions de funcionaments, mitjançant la modificació de la composició del material.
- TEWI més baix que les unitats de compressió de vapor.

Hi ha un ampli rang de materials que presenten un efecte magnetocalòric significatiu, gran part estan formats per terres rares.

- Els aliatges Gd-R, on R representa un altre metall Lantanoide (Tb, Db, Ho i Er).

- $Fe_{49}Rh_{51}$ presenta un efecte magnetocalòric alt al voltant la temperatura ambient, però el alt cost del Rh no el fa comercialitzable.
- Sèrie $Gd_5(Si_{4-x}Ge_x)$ on el més destacat és el $Gd_5Si_2Ge_2$. Aquests presenten una transició de primer ordre.
- Sèrie $MnAs_{1-x}Sb_x$. Aquests presenten una transició de primer ordre.
- Sèrie $La(Fe_{1-x}Co_x)_{11.9}Si_{1.1}$. Aquests presenten una transició de segon ordre, i ajustar a la temperatura de treball es fa modificant la composició de Co.

Si el ΔS_{mag} és alt però té una ΔT_{ad} baixa, només es pot fer servir per refredar utilitzant una font de calor específica, però no per l'establiment de un gradient de temperatura com es requereix per la refrigeració i la bomba de calor. Precisament és per això que els aliatges de Heusler de baix cost i lliures de elements rars no es consideren per el desenvolupament de sistemes magnètics de refrigeració i bombeig de calor.

D'altre banda, alguns investigadors han tingut en compte factors per la seva obtenció de MMC segons la seva disponibilitat geogràfica, la predisposició a ser reciclaves, entre altres... I han conclòs que certs materials com el gadolini presenten varies dificultats per ser utilitzats en els sistema de refrigeració en massa.

Però per la versatilitat de gadolini i els seus aliatges, es ideal per l'estudi del sistemes de refrigeració a nivell experimental.

Aliatges Ni-Mn-In-(Co) Heusler: es troben entre un nivell mig o alt, en funció del seu contingut de In i Co en la seva composició. També tenen dificultats afegides per la seva incorporació en els dispositius magnetocalòrics degut a les seves propietats magnetocalòriques.

Grup La-Fe-Si-Co: es troben en un rang de risc mig a baix, perquè no solen contenir gaire contingut de Co.

Entre aquells aliatges que presenten baix risc es troben els La-Fe-Si-X-H i els Mn-Fe-P-Si.

Tot i que, els MMC tenen un potencial d'esgotament de la capa d'ozó i una potència de escalfament global nul·la, també s'ha de tenir en compte l'impacte d'escalfament equivalent

total (TEWI⁴). De fet, ja s'ha investigat, i en comparació amb les unitats de compressió de vapor, els compostos $Gd_5Si_2Ge_2$ i $LaFe_{11.384}Mn_{0.356}Si_{1.26}H_{1.52}$ presentaven un valor inferiors; també van demostrar que el TEWI d'un cicle AMR que fa servir un MMC de primer ordre és millor que els de segon ordre.

Gran part d'aquests criteris els compleixen els materials La-Fe-Si-H i Mn-Fe-P-Si (però recordem que presenten el problema de la histèresi tèrmica, i les manganites presenten una conductivitat tèrmica molt baixa.

El Gadolini és l'element en estat pur que presenta un EMC elevat, amb propietats mecàniques que faciliten la seva fabricació en diferents formes, el fan molt útil per estudiar els sistemes de refrigeració. Malgrat la seva classificació de terres rares, és un material relativament abundant, però al no trobar-se en estat pur resulta un material costós.

⁴ “*Total Equivalent Warming impact*” és un factor que incorpora les emissions directes i indirectes durant el cicle de vida del refrigerant (des de la seva producció fins la seva eliminació final).

5.3. Fonts de camp magnètic

És una de parts essencials del dispositiu magnetocalòric, i alhora, la més pesada i cara. Principalment, es diferencien 4 tipus:

❖ Imants permanents:

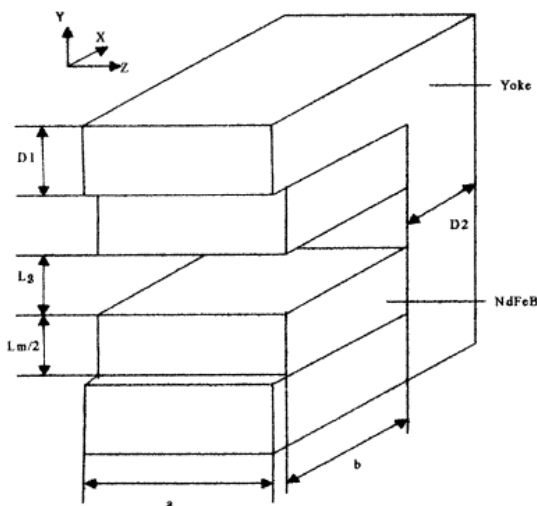


Figura 4: Sistema de font magnètica format per NdFeB i un material magnètic tou, per moviments lineals. Font: Y. B. Tang (2004).

En el cas de ser aquests l'element mòbil per produir les fases de magnetització i desmagnetització, s'utilitza un sistema de conducció o motor i una transmissió d'engranatges.

Normalment, es fan servir moviments lineals o rotacionals del MMC en relació a la font del camp magnètic.

En els últims anys, les investigacions se han centrat en la optimització i disseny d'imants permanents rotatius fent servir una matriu Halbach (consisteixen d'un imant permanent o

una combinació del imant permanent i un material ferromagnètic tou).

Els imants permanents basats en terres rares (Nd i Nd-Fe-B) podien produir un coll d'ampolla cap a la comercialització de refrigeració magnetocalòrica i bombeig de calor.

En les aplicacions de refrigeració magnètica a temperatura ambient s'utilitza els imants permanents com a font de camp magnètic.

- Degut al seu cost i les seves limitacions en l'energia magnètica, se sol aplicar un camp entre 0.8 i 1.5T.

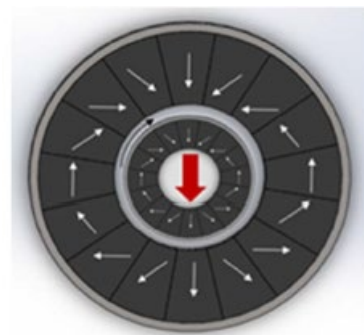


Figura 6: Dos imants Halbach concèntrics per moviments lineals. Font: Z. Li (2019).

❖ Imants superconductors.

Funcionaven a una freqüència bastant baixa i produïa un camp magnètic molt fort, el que permetia una diferència tèrmica gran entre la font de calor i el dissipador de calor. Però som massa cars com per la seva implementació a petita escala.

❖ Electroimants.

El inconvenient més important és que necessiten d'un alta subministració elèctrica pel seu funcionament, i a més no es possible implementar-lo a altes revolucions ja que per passar d'un estat apagat a encès, tarda un temps mínim.

❖ Imants híbrids (o electro-permanents).

5.4. Avaluació del rendiment

El coeficient de rendiment (COP^5) és el rati de l'energia generada pel sistema entre l'energia subministrada al sistema, que ens permetrà avaluar el rendiment del cicles i comparar-los. En el cas de la refrigeració:

$$COP_{fred} = \frac{Q_{fred}}{W_{magnètic}} \quad \text{Eq. 14}$$

No té en compte les pèrdues en el sistema.

$$COP_{fred_ideal} = \frac{Q_{fred}}{W_{magnètic}} = \frac{Q_{fred}}{Q_{calent} - Q_{fred}} \quad \text{Eq. 15}$$

$$COP_{fred_ideal} = \frac{T_f \cdot \Delta S_m(T_f, \Delta B)}{T_c \cdot \Delta S_m(T_c, \Delta B) - T_f \cdot \Delta S_m(T_f, \Delta B)} \quad \text{Eq. 16}$$

On idealment l'entropia no depèn de la temperatura: $\Delta S_m(T_c, \Delta B) = \Delta S_m(T_f, \Delta B)$

$$COP_{fred_ideal} = \frac{T_f}{T_c - T_f} = \eta_{Carnot} \quad \text{Eq. 17}$$

L'estat estacionari s'arriba quan la temperatura del fluid a la sortida del regenerador no canvia substancialment durant dos períodes consecutius. En aquest estat es calcula les característiques del AMR:

- Diferència de temperatura entre els extrems.
- Potència frigorífica

$$\dot{Q}_R = f \int_0^{\tau_f} \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,c,in}(t) - T_{f,c,out}(t)) dt \quad \text{Eq. 18}$$

- Potència calorífica

$$\dot{Q}_H = f \int_0^{\tau_f} \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,c,out}(t) - T_{f,c,in}(t)) dt \quad \text{Eq. 19}$$

⁵ "Coefficient of Performance".

- Eficiència:

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_R}{P_{magnètica} + P_{bomba}} \quad \text{Eq. 20}$$

$$P_{bomba} = \frac{\dot{m}_f \cdot \Delta p}{\rho_f \cdot \eta_{bomba}} \quad \text{Eq. 21}$$

$$P_{magnètica} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_R = m_{mmc} \cdot f \int_0^L \left(\int_0^\tau T_s(x, t) \cdot \frac{ds(x, t)}{dt} dt \right) dx \quad \text{Eq. 22}$$

L'interès d'estudiar un cicle a potència zero es per obtenir una diferència de temperatura màxima en el regenerador, en definitiva, veure el seu rang de funcionament.

6. Regenerador Magnètic Actiu (AMR)

Regeneradors magnètics actius (AMR⁶): consisteix en un regenerador que actua com un intercanviador de calor indirecte (transferència de calor per convecció mitjançant un fluid que s'emmagatzema o es transfereix periòdicament en un cicle tancat passant sempre pel material del regenerador) i contribueix activament al efecte magnetocalòric.

Regenerador magnetocalòric:

- Ha tenir una superfície de transferència de calor molt gran per assegurar un flux de calor per convecció eficient entre el fluid i el sòlid.

La transferència de calor per convecció depèn força de l'escala del calor transmès entre un cos en particular i el flux del treball. Una mesura d'això és pel nombre de Nusselt, que està relacionat amb el coeficient de transferència de calor i la conductivitat tèrmica el fluid, i inversament relacionat amb la longitud característica del buit o canal de fluid particular.

La porositat del regenerador depèn en gran mesura de les propietats del MMC, la viscositat i les propietats tèrmiques del fluid de treball i de la dinàmica del fluid.

En el cas de fer-se servir un gas com a fluid de treball, la porositat hauria de ser relativament alta. D'altra banda, si es fa servir aigua que conté inhibidors anticorrosius i/o anticongelant, la porositat hauria d'estar en un rang entre 35-45%.

- Capacitat de fabricació.
- Estabilitat mecànica (cíclica): és una característica a tenir en compte, sobretot dels MMC de primer ordre ja que presenten canvis de volum per magnetostricció.

Un regenerador de calor actua com a intercanviador de calor que serveix per emmagatzemar calor, per després cedir o absorbir calor del fluid; normalment té una estructura porosa per on passa el fluid de treball (HTF) periòdicament i de manera oscil·latòria, és a dir, dins d'una mateix període el flux passa dos cops per la mateixa direcció, però sentit contrari:

- Bufat en calent: entra un fluid calent cedint calor al regenerador per convecció, escalfant-lo i refredant-se ell mateix.

⁶ "Active Magnetic Regenerator"

- Bufat en fred: entra un fluid fred absorbint calor del regenerador per convecció, refredant-lo i escalfant-se ell mateix.

Si el regenerador de calor és un material magnetocalòric, realitza una doble funció:

- La prèviament descrita funció d'emmagatzemar calor i la seva transferència cap o des de el fluid.
- Generació o absorció de calor pel treball realitzat per la font de camp magnètic, és a dir, per l'efecte magnetocalòric.

Fins el moment, és de les millors maneres per explotar l'efecte magnetocalòric i també és el més utilitzat. Tot i que, els AMRs poden fer-se servir en diferents cicles, el cicle Brayton és el més utilitzat, i com aquest treball ha de verificar la precisió del sistema de refrigeració simulat, per l'abundància de dades experimentals, s'ha triat aquest cicle amb AMR.

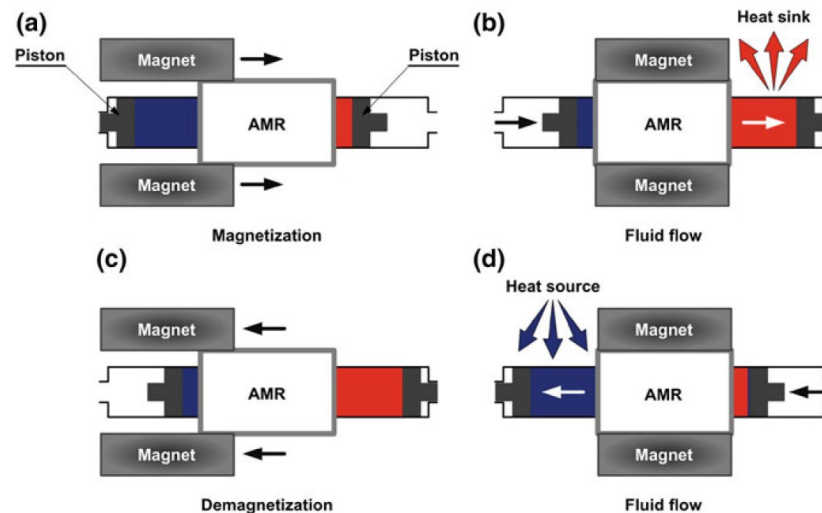


Figura 7: Esquema del funcionament d'un cicle AMR basat en el cicle Brayton per dispositius de desplaçament lineal.

Trobem diferents tipus, segons el moviment de l'imant respecte el regenerador:

- Lineal (recíproc).
- Rotatiu.

Realitzar els processos a temps petits (a alta freqüència) millora el rendiment ja que redueix les pèrdues de calor.

El factor d'utilització del fluid ens indica la ratio entre la capacitat calorífica del fluid i el material magnetocalòric durant un sol període de bufat.

$$u = \frac{\dot{m}_f \cdot c_f \cdot \tau_f}{m_{MMC} \cdot \bar{c}_{MMC}}$$

Eq. 23

Una bona alternativa per ampliar el rang de temperatures per la qual el MMC pot treballar, és el AMR per capes amb diferents temperatures de Curie en la direcció de circulació del fluid. Però sobretot és molt utilitzat amb materials de transició de segon ordre (Mn-Fe-P, La-Fe-Si).

Hi ha dos maneres d'aproximar el model AMR en termes de potència de refredament, diferència de temperatura, eficiència, treball magnètic subministrat, etc.

- Estat estacionari (independent del temps).

Suposen que el MMC treballa amb un cicle ideal termodinàmic. Les corresponents pèrdues (pèrdues de transferència de calor entre el fluid i el MMC, pèrdues de viscositat, pèrdues degut a la conductivitat tèrmica longitudinal, etc.) es tenen en compte, aplicant-se correccions.

Es caracteritzen per tenir una baixa carrega computacional amb resultats no massa llunyans que els experimentals. Però no estan capacitats per incorporar les interaccions entre les pèrdues de mecanismes.

- Dinàmic (depèn del temps).

Es basen en les equacions de les energies del MMC i del HTF.

- o 1D: és el més aplicat, perquè presenta una eficiència computacional elevada per la màxima simplificació del model.

Es considera que el flux del fluid i la conductivitat tèrmica només es produeixen en la direcció de la circulació del fluid.

Important: coeficient de transferència de calor (nombre de Nusselt) que defineix la taxa de transferència de calor entre el MMC i el HTF.

- o 2D: es considera que el flux del fluid i la conductivitat tèrmica es produeixen en dos direccions (paral·lel i perpendicular a la direcció de circulació del fluid).

Les equacions de govern no estan directament relacionades amb el coeficient de transferència de calor.

Moltes vegades esta imitada per la geometria del AMR

- o 3D

El model matemàtic del AMR esta basat en les equacions de govern de les energies del MMC i HTF. En general, es fan les següents suposicions:

- No hi ha intercanvi de calor amb l'exterior, la carcassa del regenerador esta perfectament aïllada tèrmicament.
- No hi ha pèrdues de fluid.
- El MMC esta distribuït equitativament, la porositat és homogènia i no hi ha una mala distribució del flux del fluid.
- El fluid és incompressible (vàlid només pels líquids).
- El volum mort es considera negligible.
- La transferència de calor per radiació en el regenerador es considera negligible a comparació de transferència de calor per conducció i convecció.
- El camp magnètic aplicat és igual al camp magnètic intern in el MMC, és a dir, la desmagnetització produït per el MMC es negligible.

En els models 2D i 3D, el perfil de velocitat es calculat per les equacions de Navier-Stokes.

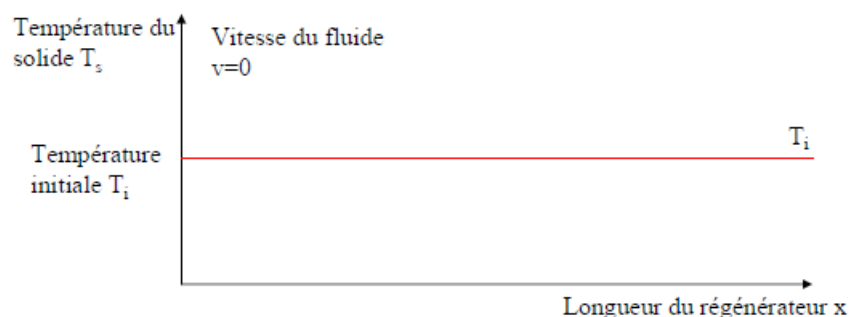
La implementació de l'efecte magnetocalòric com una font de calor volumètrica en les equacions de govern ens permet una aproximació més realista del perfil de temperatura i camp magnètic, com també es possible aplicar un transferència de calor simultània amb el fluid. Aquest mètode necessita de dades sobre la magnetització o l'entropia magnètica i la capacitat calorífica per diferents temperatures i camps magnètics.

DIAGRAMA DEL CICLE AMR

(0) Inici:

Suposant que no hi ha intercanvi amb l'entorn (sistema del regenerador aïllat), de manera, que no hi ha pèrdues.

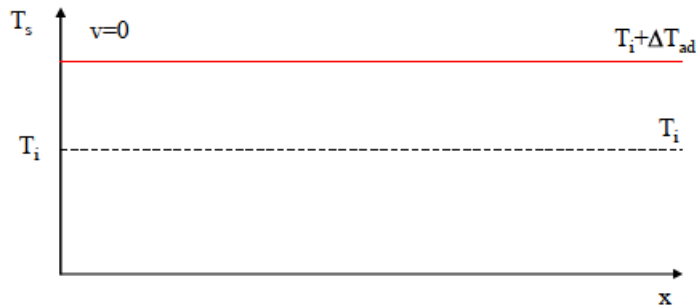
El camp magnètic aplicat és nul o molt proper a 0T. El fluid i el regenerador es troben en equilibri tèrmic.



Gràfica 11: Perfil de temperatura en la direcció de flux a l'inici del cicle. Font: (Legait, 2011)

(1) Magnetització adiabàtica:

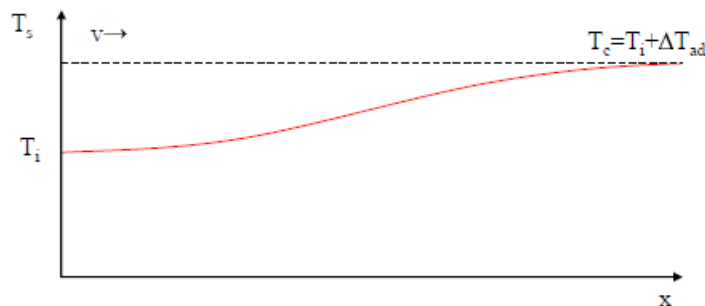
Durant un temps determinat (τ_{mag}), l'imant és va apropant al regenerador magnetitzant el regenerador sense intercanvi de calor, aleshores el MMC incrementa la seva temperatura (ΔT_{ad}).



Gràfica 12: Perfil de temperatura en la direcció de flux després de la magnetització adiabàtica. Font: (Legait, 2011)

(2) Refrigeració isomagnètica:

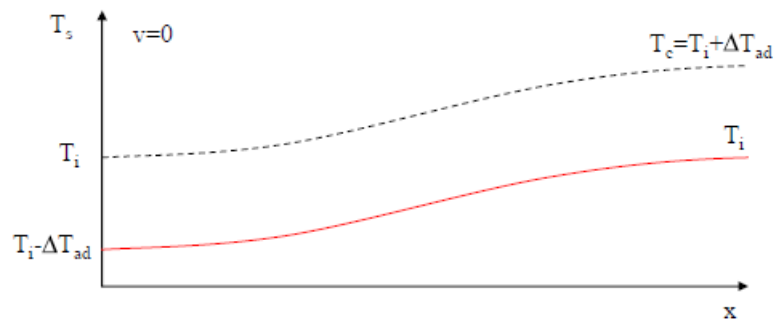
Durant un temps τ_{flux} la impulsió del fluid des de el CHEX cap al HHEX, passant pel regenerador, generant un perfil de temperatures en direcció del flux amb un gradient entre l'entrada (costat fred) i la sortida (costat calent).



Gràfica 13: Perfil de temperatura en la direcció de flux al final de la fase de bufat en fred. Font: (Legait, 2011)

(3) Desmagnetització adiabàtica:

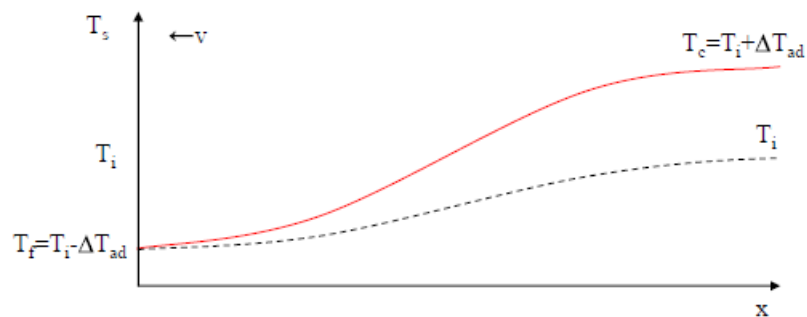
El temps de desmagnetització es considera igual a la de magnetització (τ_{mag}). En aquesta fase la temperatura del regenerador baixa ΔT_{ad} uniformement, i com el fluid no circula, es conserva el gradient de temperatura obtingut en la fase anterior.



Gràfica 14: Perfil de temperatura en la direcció de flux al final de la desmagnetització adiabàtica. Font: (Legait, 2011)

(4) Escalfament isomagnètica:

El temps pel qual s'impulsa el fluid del HHEX al CHEX és el mateix que en la fase 2 (τ_{flux}). S'observa que s'amplifica el gradient de temperatura.



Gràfica 15: Perfil de temperatura en la direcció de flux al final de la fase de bufat en calent. Font: (Legait, 2011)

A grans trets es poden classificar en estructures:

- "Packed-bed"

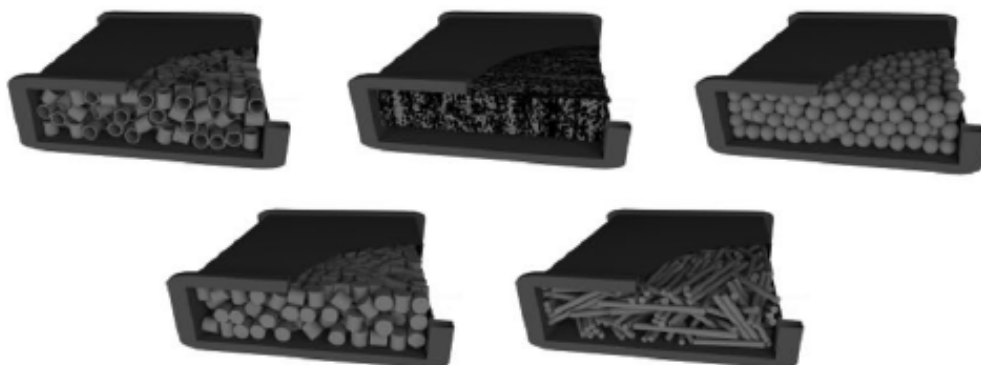


Figura 8: "Packed-bed". Font: (Kitanovski, Energy application of magnetocaloric materials, 2020)

- Ordenades



Figura 9: Estructures ordenades. Font: (Kitanovski, Energy application of magnetocaloric materials, 2020)

7. Models numèrics

En aquest apartat es parla sobre les equacions per simular un sistema multi-físic: transferència de calor, flux del fluid, magnetisme i l'efecte magnetocalòric. Hi ha diferents tipus de models numèrics per la refrigeració magnètica segons les simplificacions considerades: 1D, 2D i 3D. Però també han sorgit models que fan els càlculs amb paràmetres adimensionals.

(Engelbrecht, et al., 2013) van millorar els models de simulació numèrica anteriors de RMA i van comparar les prediccions del nou model amb els resultats experimentals, i van concloure que tant el modelat numèric com la implementació experimental eren molt sensible als efectes de la desmagnetització, la mala distribució de flux del fluid i dels guanys o pèrdues de calor.

El model de RMA havia de considerar la transferència de calor interna irreversible, les pèrdues viscoses, les pèrdues per desmagnetització, pèrdues de calor i la presència de volums morts entre cada extrem del regenerador i l'extern (font de calor i dissipador de calor) intercanviadors de calor.

Els regeneradors que fan servir diferents capes de compost, per les diferències de T_c superiors a 10 K entre dos capes consecutives, causa el funcionament independent d'aquesta última, traduint-se en una disminució del rendiment.

La comparació del rendiment per diferents AMR en capes va portar a determinar el grau de millora del MMC necessari per que un sistema de refrigeració magnètica superi a un sistema de compressió de vapor:

- Requisit de uniformitat de la temperatura de transició per cada capa de material magnetocalòric.
- Requisit d'un petit increment en la temperatura de transició entre capes adjacents.
- Requisit estabilitat cíclica dels materials.
- Cal que els MMC exhibeixin un ΔT_{ad} 2.35 vegades més que els materials actuals.

Problemes dels RMA:

- La mala distribució del flux en el regenerador afecte en el rendiment i podria causar grans pèrdues irreversibles.
- Necessitat de sincronitzar el camp magnètic i el flux del fluid.
- Les pèrdues viscoses també tenen efectes sobre el coeficient de rendiment (COP^7).

⁷ "Coefficient of performance"

7.1. Equacions de govern del HTF

L'equació descriu la continuïtat del fluid.

$$\vec{U} = (u_x, u_y, u_z) \quad \text{Eq. 24}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad \text{Eq. 25}$$

Les equacions descriuen el moment del fluid.

$$\rho_f \cdot \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \vec{\nabla}) \vec{U} \right) = -\vec{\nabla} P + \mu_f \vec{\nabla}^2 \vec{U} \quad \text{Eq. 26}$$

Finalment tenim l'equació de l'energia on el relacionem amb el regenerador.

$$\rho_f c_{p,f} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} T_f \right) = k_f \vec{\nabla}^2 T_f \quad \text{Eq. 27}$$

7.2. Equacions de govern del regenerador

Per el sòlid tenim l'equació de l'energia:

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \vec{\nabla}^2 T_s + MCE \quad \text{Eq. 28}$$

On el terme *MCE* representa l'efecte magnetocalòric quan s'hi implementa com una font d'energia. Per el seu càlcul s'ha utilitzat diferents models:

- La teoria del camp mitjà⁸ de Weiss: pel càlcul de l'entropia magnètica i de la calor específica magnètica.
- Model de Debye: pel càlcul de l'entropia de xarxa i la calor específica de xarxa.
- Model de Sommerfeld: pel càlcul de l'entropia elèctrica i la calor específica elèctrica.

⁸ "Mean Field Theory" (MFT)

7.2.1. Model 1: (Ezan, et al., 2017) modificat

En aquest article s'ha introduït l'EMC com una font energètica volumètrica en l'equació de l'energia del regenerador:

$$MCE = \rho_s c_{p,s} \left(\frac{\partial T}{\partial B} \right)_s \frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{Eq. 29}$$

On el terme $\left(\frac{\partial T}{\partial B} \right)_s$ correspon al canvi de temperatura que pateix el MMC quan esta sotmès en un camp magnètic diferent de 0. La següent equació ens la relaciona amb ΔT_{ad} que es calcula a partir de la contribució dels tres models anteriorment descrits.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial B} \right)_s = \left(\frac{\partial \Delta T_{ad}}{\partial B} \right)_s \quad \text{Eq. 30}$$

En aquest article proposa el càlcul de la variació de la temperatura adiabàtica, de la manera següent:

$$\Delta T_{ad} = \frac{T}{c_{p,s}(B, T)} \cdot S_{total}(B, T) \quad \text{Eq. 31}$$

Sent l'entropia total com la suma de les seves contribucions magnètica, de xarxa i elèctrica. Aquesta última, es negligeix perquè a temperatura ambient té una contribució més petita en comparació a les altres.

$$S_{total}(B, T) = S_m(B, T) + S_l(T) + S_e(T) \quad \text{Eq. 32}$$

Però hem obtingut resultats molts dispersos. Fins i tot, quan el material no esta sotmès a un camp magnètic, tindriem un canvi de temperatura adiabàtica. Així que hem canviat aquesta formula per una de més comú trobada en la literatura:

$$\Delta T_{ad} = - \int_{B_i}^{B_f} \frac{T}{c_{p,s}(B, T)} \left(\frac{\partial M(B, T)}{\partial T} \right)_B dB \quad \text{Eq. 33}$$

Però donat que no teníem la fórmula de la magnetització específica, vam fer ús de la relació de Maxwell:

$$\left(\frac{\partial M(B, T)}{\partial T} \right)_B = \left(\frac{\partial S(B, T)}{\partial B} \right)_T \quad \text{Eq. 34}$$

Finalment, obtindríem la següent equació:

$$\Delta T_{ad} = - \int_{B_i}^{B_f} \frac{T}{c_{p,s}(B, T)} \left(\frac{\partial S_T(B, T)}{\partial B} \right)_T dB \quad \text{Eq. 35}$$

On la calor específica es calcula a partir de les entropies magnètica i de xarxa:

$$c_{p,s}(B, T) = T \left(\frac{\partial S_T}{\partial T} \right)_B \quad \text{Eq. 36}$$

- Entropia magnètica:

$$S_m = \frac{Ru}{Mm} \left\{ \ln \left[\sinh \left(\frac{2J+1}{2J} X \right) \right] - \ln \left[\sinh \left(\frac{1}{2J} X \right) \right] - X \cdot B_J(X) \right\} \quad \text{Eq. 37}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B_J(X) = \frac{2J+1}{2J} \coth \left(\frac{2J+1}{2J} X \right) - \frac{1}{2J} \coth \left(\frac{1}{2J} X \right) \\ X = \frac{g_J \mu_B J}{k_B} \cdot \frac{B}{T} + \frac{3T_C J}{J+1} \cdot \frac{B_J(X)}{T} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Eq. 38} \\ \text{Eq. 39} \end{array}$$

Donat que l'equació de Brillouin depèn de ella mateixa, s'haurà d'iterar fixant un cert criteri d'error, per tal de trobar el seu valor.

- Entropia de xarxa:

$$S_i = \frac{Ru}{Mm} \left[-3 \ln \left(1 - e^{-T_d/T} \right) + 12 \left(\frac{T}{T_d} \right)^3 \int_{x=0}^{T_d/T} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \right] \quad \text{Eq. 40}$$

Respecte a l'integral, no s'ha pogut resoldre per tal de deixar-la com una funció de la temperatura. Per resoldre'l s'ha optat per utilitzar la definició d'integral, és a dir, fer la suma de les àrees per sota la corba; aquestes àrees han de ser prou petites com per dotar al sistema d'una bona precisió. Tot i així, la càrrega computacional no ha sigut elevada.

7.2.2. Model 2: (Ezan, et al., 2017) modificat aplicat en un període de temps

Aquest model aplica les mateixes equacions que el model 1, però amb la diferència que té en compte el període de magnetització i desmagnetització.

Se sap que l'EMC es produeix instantàniament donat un increment B , però a la realitat no es possible variar aquest B en un temps summament, en alguns casos depèn de la freqüència del motor en moure l'imant permanent i en altres depèn de la intensitat subministrada com per exemple un electroimant. Però en tot cas, les fases de magnetització i desmagnetització es realitzen en un interval de temps.

Aquest model esta fortament lligat al temps, de manera que per cada final de l'interval de temps es calcula el ΔT_{ad} que s'ha produït per un augment parcial del B . D'aquesta manera se simula una variació continua de B i de la temperatura del MMC.

Donat que ΔT_{ad} depèn ara del temps, per obtenir resultats precisos cal realitzar els càlculs amb un interval de temps molt petit, al voltant de 10^{-4} s, fet que fa augmentar la càrrega computacional en el programa i, en conseqüència, en el temps per obtenir els resultats.

7.2.3. Model 3: (Petersen, et al., 2008)

En aquest model hi ha una lleugera variació en les formules de les calors específiques, i a més, el càlcul de la ΔT_{ad} es fa a partir de la funció de la magnetització específica (σ):

$$\Delta T_{ad} = -\mu_0 \int_{H_i}^{H_f} \frac{T}{c_{p,s}} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right)_B dH \quad \text{Eq. 41}$$

On la calor específica equival a la suma de les seves contribucions.

$$c_{p,s} = c_m + c_l + c_e \quad \text{Eq. 42}$$

- Calor específica magnètica:

$$c_m = -\mu_0 H \frac{\partial \sigma}{\partial T} - \frac{1}{2} N_{int} \frac{\partial (\sigma^2)}{\partial T} \quad \text{Eq. 43}$$

$$N_{int} = \frac{3k_B T_d}{N_s g^2 \mu_B^2 J(J+1)} \quad \text{Eq. 44}$$

On la magnetització específica depèn de la funció de Brillouin $B_J(X)$, la formula és la mateixa que l'assenyalada en el model 1.

$$\sigma = N_s g J \mu_B B_J(X) \quad \text{Eq. 45}$$

- Calor específica de xarxa:

$$c_l = 9Nk_B \left(\frac{T}{T_d}\right)^3 \int_{x=0}^{T_d/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad \text{Eq. 46}$$

- Calor específica elèctrica:

$$c_e = \gamma_e T \quad \text{Eq. 47}$$

Cal esmenar que tal com indica l'article, s'ha agafat $T_d = 169 \text{ K}$. En els altres, en canvi, T_d pren el valor de 183 K ,

7.2.4. Model 4: (Bouchard, Nesreddine, & Galanis, 2009) i (Ezan, et al., 2017)

Referent a aquest model, fa servir la mateixa definició de ΔT_{ad} que el model anterior, realitzant també el càlcul de la derivada parcial de la magnetització específica respecte la temperatura. La diferència és la calor específica que la calcula a partir de les contribucions de l'entropia, i en concret aplica una correcció que només depèn de la entropia magnètica i de dades experimentals a camp magnètic zero.

$$\Delta T_{ad} = - \int_{B_i}^{B_f} \frac{T}{c_{p,s}(B, T)} \left(\frac{\partial M(B, T)}{\partial T} \right)_B dB \quad \text{Eq. 48}$$

$$c_{p,s}(B, T) = c_{p,s}(0, T) - T \frac{\partial}{\partial T} (S_m(0, T) - S_m(B, T)) \quad \text{Eq. 49}$$

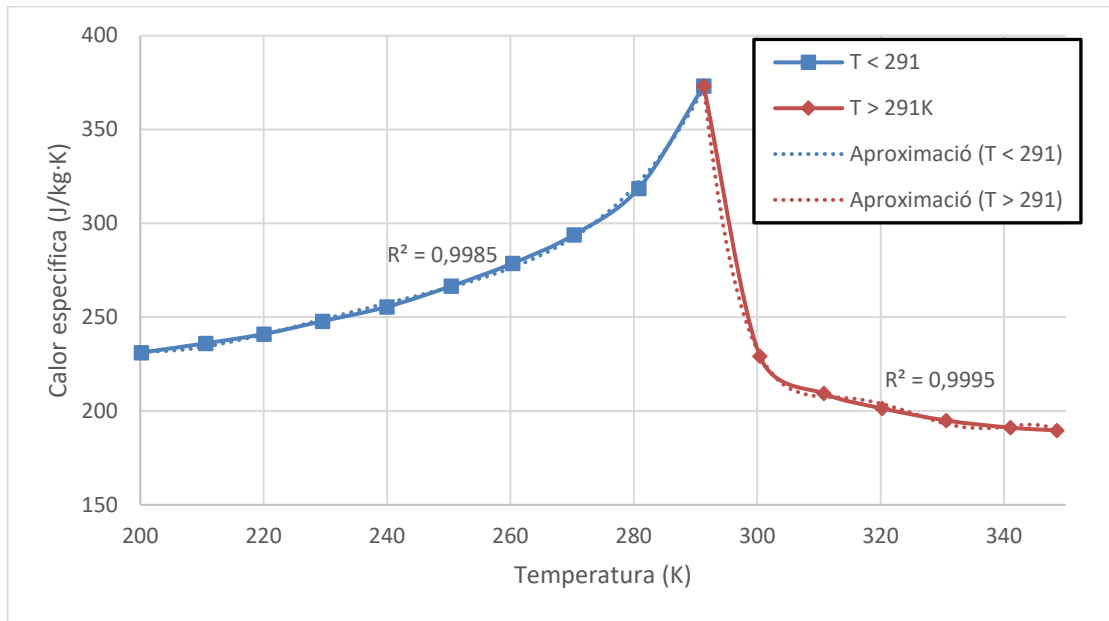
On $c_{p,s}(0, T)$ s'ha extret de dades experimentals sense estar sotmès a un camp magnètic. Seguidament, s'ha aproximat a partir de dues funcions polinòmiques:

- Per temperatures menors de 291 K s'aplica una funció polinòmica de grau 4:

$$c_{p,s}(0, T) = (7,22705 \cdot 10^{-6})T^4 - (6,76612 \cdot 10^{-3})T^3 + (2,37368)T^2 - (3,68997 \cdot 10^2)T + 2,16496 \cdot 10^4 \quad \text{Eq. 50}$$

- Per temperatures superiors de 291 K s'aplica una funció polinòmica de grau 5:

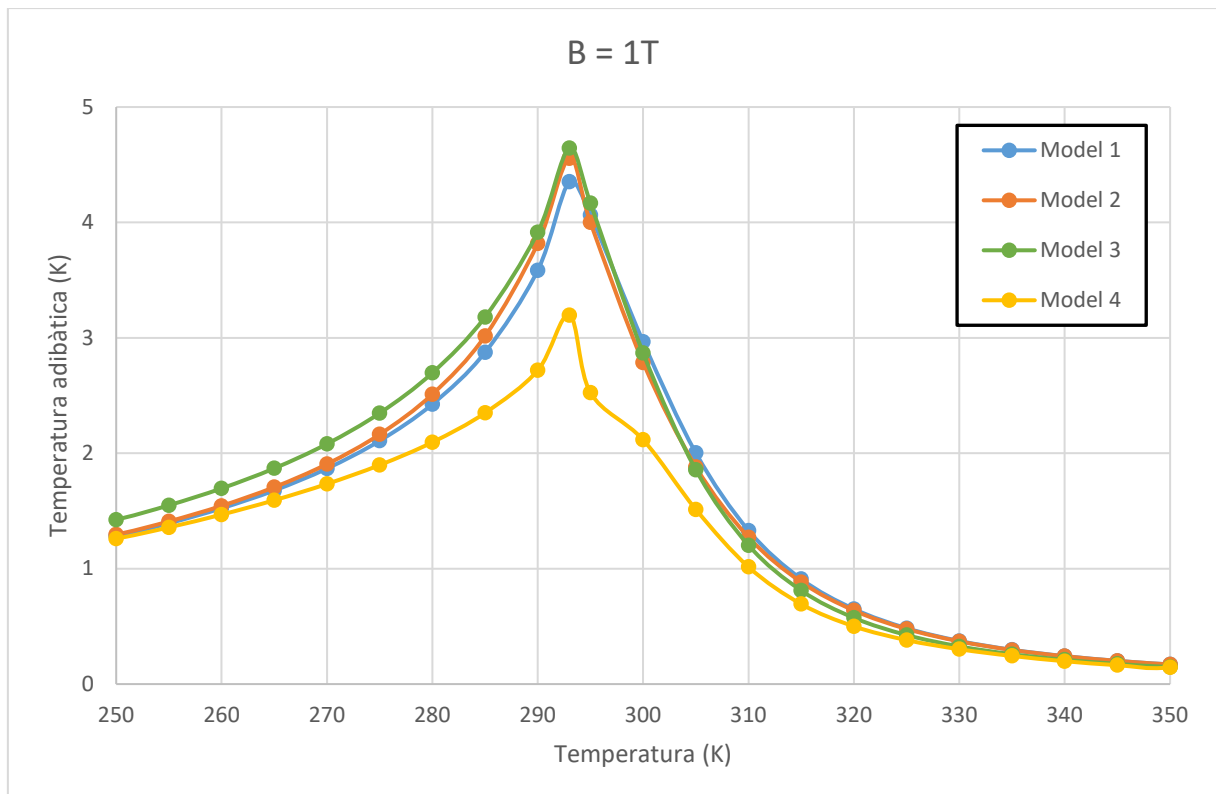
$$c_{p,s}(0, T) = -(5,6273510984 \cdot 10^{-6})T^5 + (9,1777211271 \cdot 10^{-3})T^4 - 5,9833537145 \cdot T^3 + (1,9491490230 \cdot 10^3)T^2 - (3,1727693058 \cdot 10^5)T + 2,0645372223 \cdot 10^7 \quad \text{Eq. 51}$$

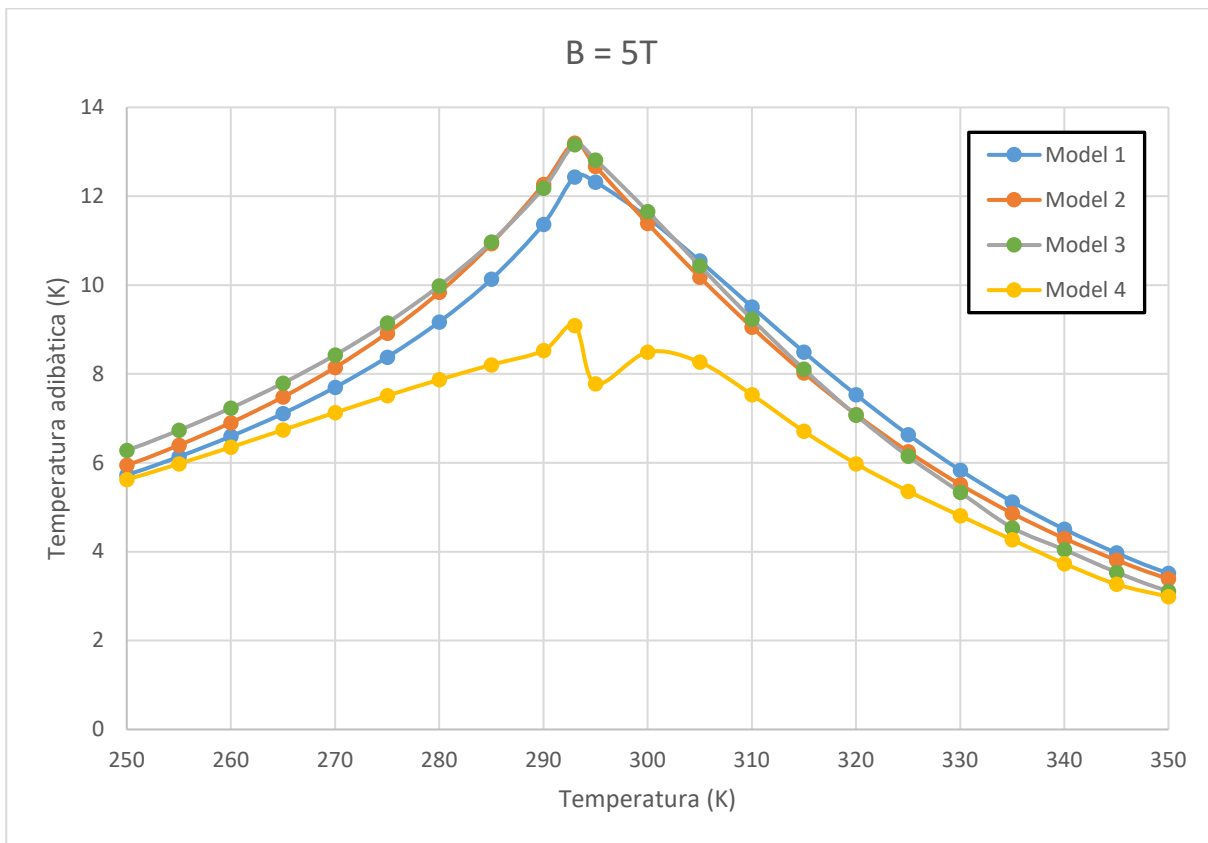


Podem observar que les dues funcions s'aproximen adequadament a les dades experimentals.

7.3. Comparació dels resultats numèrics

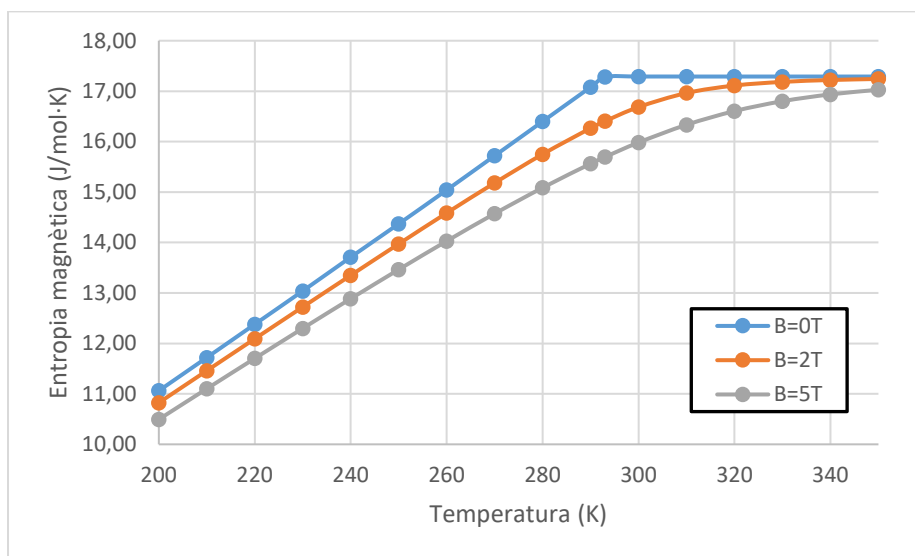
En les següent dos gràfiques podem observar els resultats per cada model numèric plantejat en l'apartat anterior. En aquest cas considerem que el camp magnètic induït és igual al aplicat.



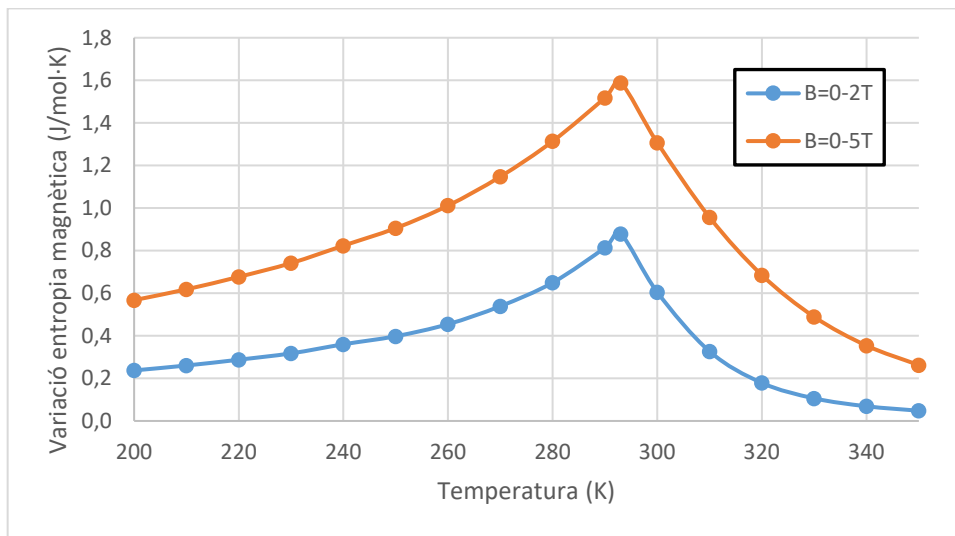


Gràfica 16: Dos diagrames de EMC-T del resultats dels models numèrics per camps de 1 i 5 T aplicats. Font pròpia realitzada amb Excel i Matlab.

Respecte als models 1, 2 i 4 que es basen pel càlcul de l'entropia s'ha verificat amb dades extretes de la bibliografia (Ezan, et al., 2017), i observem una correlació exacte:

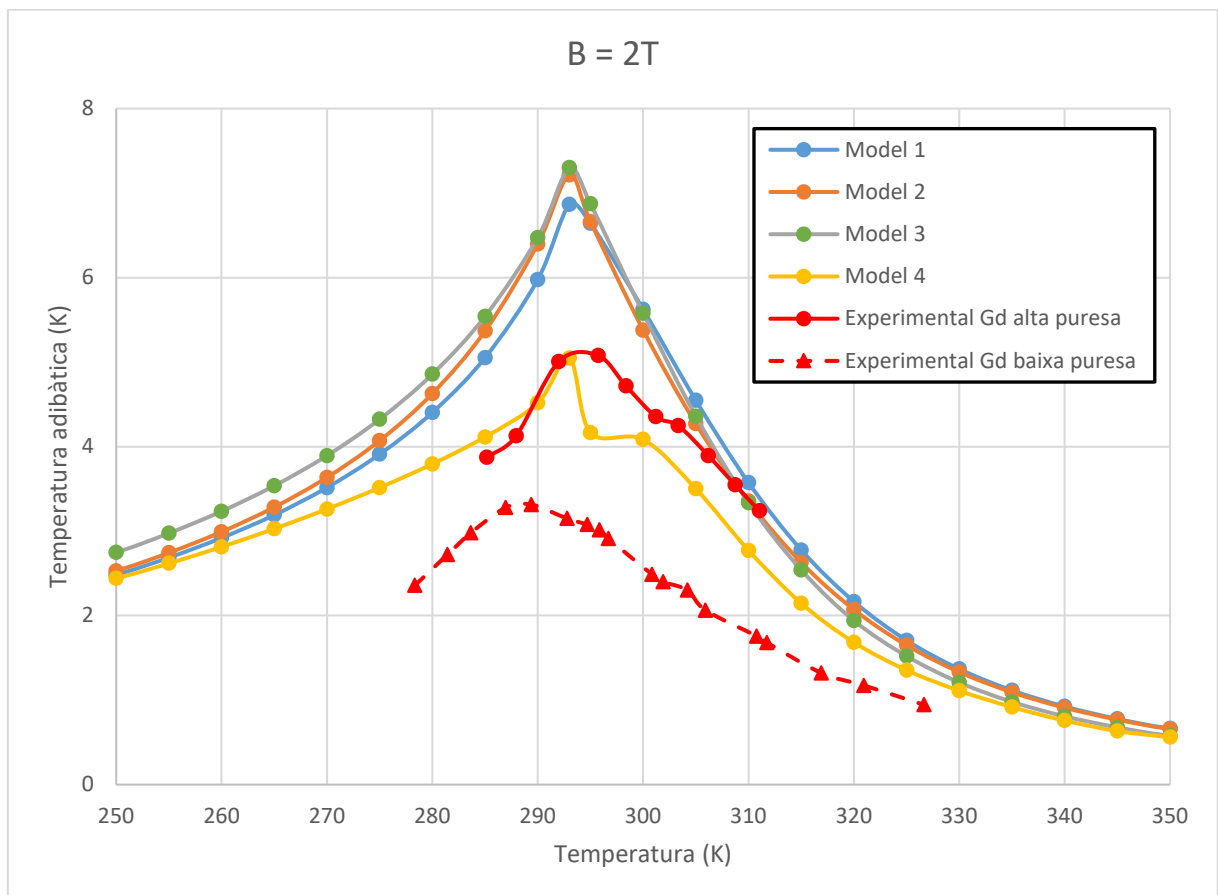


Gràfica 17: Entropia magnètica calculada i l'extreta de (Ezan, et al., 2017). Font pròpia.



Gràfica 18: Diferència d'entropia magnètica calculada i l'extreta de (Ezan, et al., 2017). Font pròpia.

També s'ha calculat el valor de EMC per un camp aplicat de 2T, per tal de comprovar la veracitat dels valors respecte els experimentals de (Dan'kov, Tishin, Pecharsky, & Gschneidner Jr., 1998)



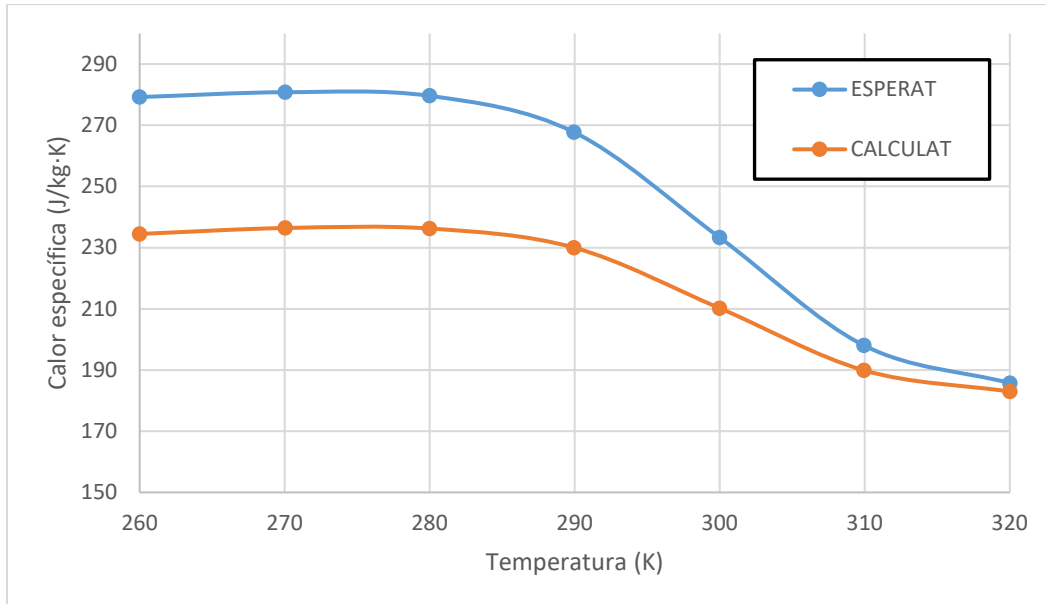
Gràfica 19: Dades numèriques calculades per un camp aplicat de 2T i dades experimentals.

Tal com s'indica en l'article de referència, els dos materials asseguren una puresa del 99.9%. En un primer anàlisis químic s'observa que la puresa és aproximadament 99.9% en ambdós casos, però respecte la base atòmica:

- Material policristal·lí produït a Xina presenta una puresa inferior, al voltant del 93.1%.
- Material policristal·lí produït per *AMES Laboratory* s'observa la mateixa puresa de 99.9%.

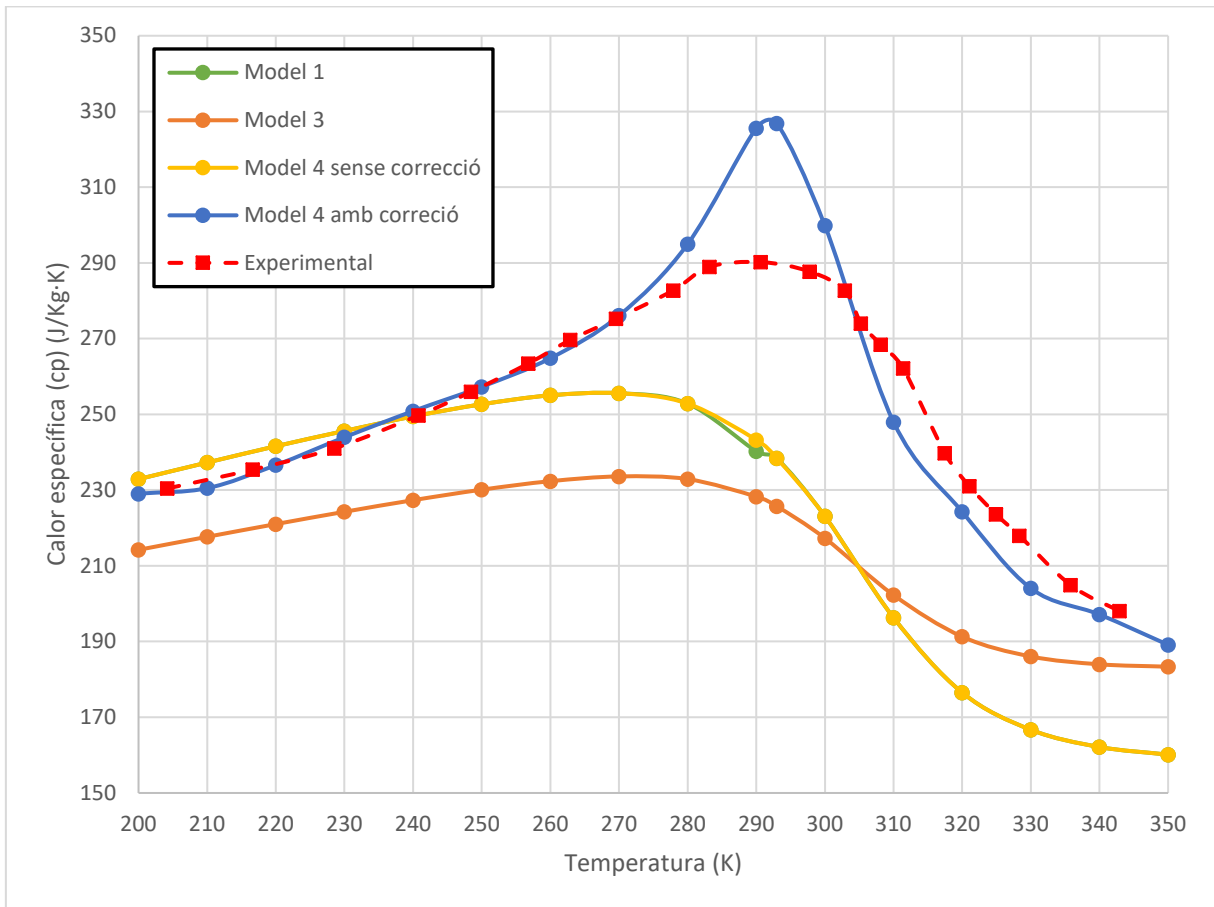
Això és determinant en els resultats, ja que una baixa puresa afecta negativament a l'EMC del material. Aquest treball s'ha basat en el prototip de (Bahl, Petersen, Pryds, & Smith, 2008) que han fet servir material amb una puresa inferior que la declarada per la productora *China Rare Metal Material Co*, i cal tenir aquesta informació en compte ja que els models numèrics s'ajusten més a materials d'alta puresa.

D'altra banda, hem observat que entre els càlculs realitzats en el model 3 i els esperats (publicat en el seu respectiu article) hi trobem una certa divergència, donat que aquest model es basa en el càlcul de la calor específica he comparat els valors obtinguts amb els esperats. En la gràfica següent podem observar la diferència i, per tant, es molt probable que l'error en la resolució de les formules provingui de la calor específica.



Gràfica 20: Comparació de la calor específica entre els valors obtinguts i esperats per (Petersen, et al., 2008) sotmès a un camp aplicat de 1T. Font pròpia.

En la següent gràfica fem la comparativa de la calor específica per cada model, exceptuant pel model 2, ja que utilitza les mateixes formules que el model 1; a més, es distingeix el model 4 abans i després de la correcció proposada per (Bouchard, Nesreddine, & Galanis, 2009).



Gràfica 21: Diagrama de calor específica respecte la temperatura per cada model i l'experimental sotmès a un camp magnètic 2T. Font pròpia.

Finalment hem triat el model 4 aplicant-l'hi la correcció de la calor específica, ja que s'ajusta prou bé a les dades experimentals, tant de la calor específica com la temperatura adiabàtica.

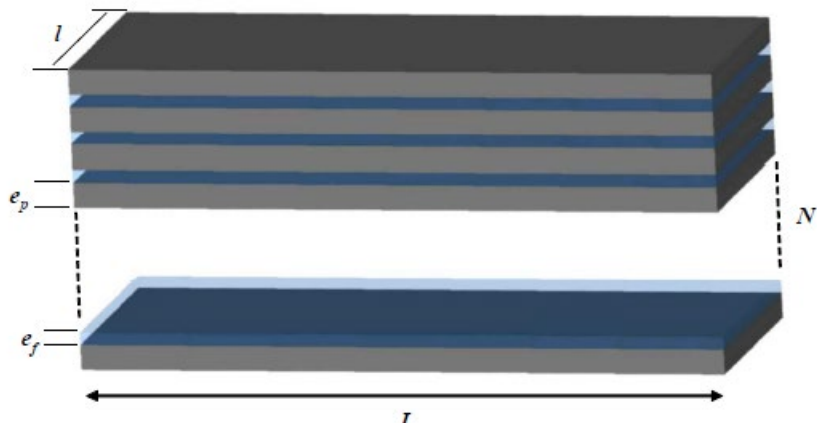
Tot i així, s'havia implementat primer el model 2 com s'indica en l'annex E.1. i E.2. amb l'objectiu de obtenir una simulació més realista, però hem vist que equivaldria a elevar la càrrega computacional de la màquina i sense una millora dels resultats.

8. Refrigeració magnètica en ANSYS Fluent

ANSYS Fluent ens permet incorporar un model numèric per estudiar el comportament del fluid i del regenerador, així com la seva transferència de calor entre ells.

En la simulació s'inclou el regenerador i el HTF. La font de camp magnètic es definirà de manera implícita en la implementació de l'EMC del regenerador.

Els intercanvis de calor per convecció es troben en la interfície entre les regions del fluid i del regenerador. D'altra banda, la conducció tindrà lloc dins de cada regió del fluid i del regenerador.



Gràfica 22: Representació d'un regenerador de N plaques paral·leles.

Representació de la geometria real del regenerador tipus plaques paral·leles, i l'espai sobrant dins del domini trobem el fluid.

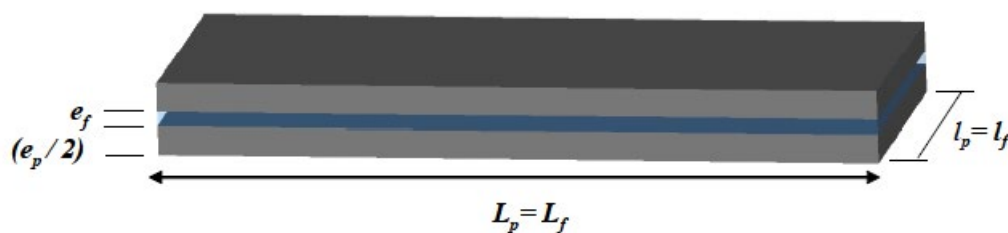
Simplificació del model:

- Dos plaques paral·leles

$$L_p \cdot l_p \cdot e_p = L \cdot (N \cdot l) \cdot \frac{e_p}{2} \quad \text{Eq. 52}$$

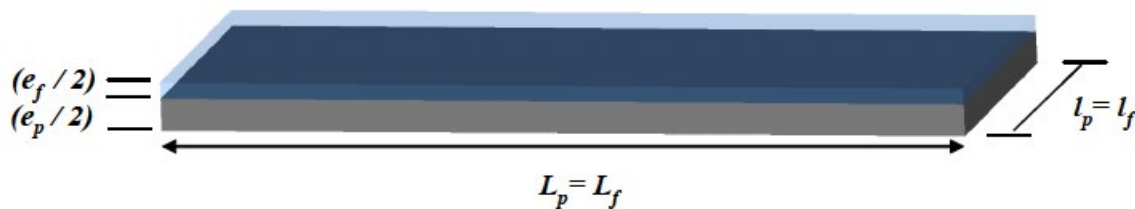
- Volum del fluid:

$$L_f \cdot l_f \cdot e_f = L \cdot (N \cdot l) \cdot e_f \quad \text{Eq. 53}$$



Gràfica 23: Simplificació de la geometria per la repetició del model en el eix y .

Per millorar l'eficiència computacional del programa es adient reduir al màxim la geometria. L'ANSYS té un condició de contorn de simetria, que ens permet reduir encara més aquesta geometria.



Gràfica 24: Simplificació de la geometria per simetria de l'ANSYS Fluent

El període d'un cicle de ARM és $\tau_c = 2\tau_{mag} + 2\tau_{flux}$.

Donat que el programa ANSYS Fluent mostra unes opcions més generals per l'anàlisi dels fluids i sòlids. El programa deixa opcions per casos més concrets que cal activar a través del TUI. Tot i així, ANSYS dota a l'usuari una manera d'introduir funcions que no porta inclòs per defecte, ens referim a les UDF⁹: un arxiu font amb extensió .c per compilar o interpretar en llenguatge C.

Per la implementació del camp magnètic intern, el canvi d'entrada del flux, del efecte magnetocalòric i la capacitat específica hem fet servir un sol UDF, amb funcions MACROS que venen definides per l'ANSYS Fluent.

- L'efecte magnetocalòric

Es pot implementar de dues formes:

- o Com un increment de temperatura, sabent que el regenerador es magnetitza instantàniament.

$$T_s(\tau_{mag}, x, y, z) = T_s(\tau_{mag}, x, y, z) \pm \Delta T_{ad} \quad \text{Eq. 54}$$

- o Com un font de calor volumètrica a l'equació de l'energia del regenerador.

- Temperatura en les fases de bufat:

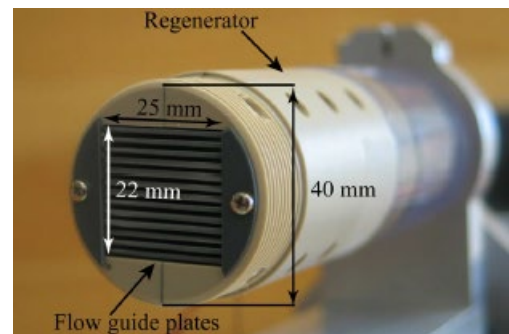
Inicialment, la temperatura de sortida es recupera en l'últim pas de temps i després s'utilitza com condicions d'entrada en el següent bufat

⁹ "User-Defined Functions"

En el perfil de velocitat en direcció del flux, es pot observar que compleix la condició de gradient zero a nivell de l'eix de la simetria. En $x=0$, el perfil és pla i tendirà a adoptar una forma parabòlica a mesura que avança el fluid.

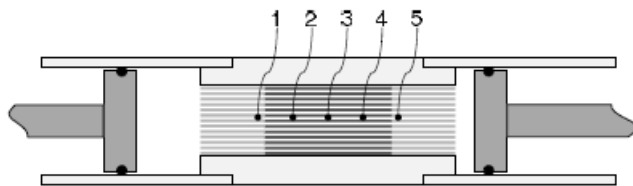
8.1. Prototip basat en (Bahl, Petersen, Pryds, & Smith, 2008)

El dispositiu de refrigeració magnètic proposat en l'article (Bahl, Petersen, Pryds, & Smith, 2008) consisteix en un cilindre de plàstic amb un secció forada rectangular per tal d'incloure les 13 plaques apilades de gadolini (Gd) de 0.9mm de gruix cadascuna, amb una distància entre elles de 0.8mm per el qual passarà el HTF.



A l'article també s'especifica que gadolini és un material comercial que afirma tenir un 99.9% de puresa. Però tal com he vist anteriorment, això no es del tot veritat i aquesta disminució de puresa tindrà efectes negatius en el resultats, sobretot a l'hora de comparar les dades experimentals amb les numèriques.

Gràfica 25: Dispositiu experimental. Font (Bahl, Petersen, Pryds, & Smith, 2008)

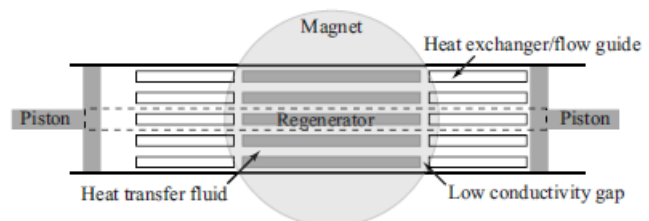


Gràfica 26: Esquema de la secció transversal del dispositiu. El nombres fan referència als termoparells. Font: (Bahl, Petersen, Pryds, & Smith, 2008)

Cada placa té una dimensió de 25mm d'ample (eix x) i 40mm en el sentit de flux (eix z). També inclou unes guies de plàstic per tal d'assegurar el règim laminar del fluid.

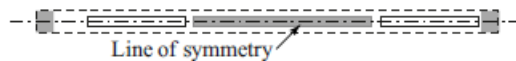
En els extrems del regenerador es troba els intercanviadors de calor de fred (CHEX) i calent (HHEX).

El fluid es desplaça en sincronia amb dos pistons que es troben cada extrem. Aquests pistons tenen un desplaçament de 0.5 a 10mm per tal de mantenir constant el temps de bufat però variar la quantitat de fluid desplaçat, en altres paraules, variar la velocitat de circulació del fluid. Tenint present que el moviment del pistó en 1mm desplaça el 9.5% de la longitud de les plaques de gadolini.

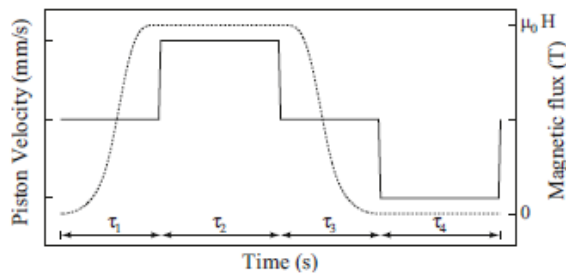


Gràfica 27: Geometria a aplicar en el model. Font: (Bahl, Petersen, Pryds, & Smith, 2008)

Tal com s'ha comentat en la secció anterior, la geometria es pot simplificar:



Donat que el cicle esta basat en Brayton, obtindrem una diagrama de B i v semblant al comentat en el apartat 6.



Gràfica 28: Diagrama del B i v . Font: (Bahl, Petersen, Pryds, & Smith, 2008)

Sempre considera el mateix temps de cicle, amb un $\tau_m = \tau_f = 3$ segons. També ens informa que el màxim camp magnètic que pot proporcionar l'electroïmant és de 1.4 T, però que en totes les dades experimental fan servir un camp magnètic màxim de 0.97 T i un mínim de 0.16 T.

Durant la realització d'aquest treball s'ha cercat diferents alternatives per la implementació d'un sistema de refrigeració magnètica:

❖ Prototip 1:

Començant per la geometria més simple d'un volum rectangular d'aigua sobre un volum rectangular de MMC, es va adaptar l'UDF per aquest prototip amb el model 2 i 4 que es pot trobar en l'annex D.2 i D.3, respectivament.

L'anàlisi dels resultats es comentaran en l'apartat 8.6 d'aquest document, però amb els resultats obtinguts ens vam veure forçats a plantejar una solució, la proposada en el següent punt.

❖ Prototip 2:

En aquest prototip s'incorporen els intercanviadors de calor i el moviment del fluid com el moviment d'un recipient tancat, que s'ajusta més al dispositiu plantejat per (Bahl, Petersen, Pryds, & Smith, 2008).

8.2. Mallat amb ANSYS Fluent

L'ANSYS sempre treballa amb el mètode d'elements finits, de manera que una geometria es discretitza en petits volums, la forma d'aquests volums son: triangular, tetraèdrica, hexaèdrica, híbrida. ANSYS Fluent resolt equacions no lineals seqüencialment mitjançant mètodes iteratius, fins arribar a un % d'error donat per l'usuari, és a dir, fins que la solució convergeixi.

Per tal d'assegurar la precisió dels resultats i garantir la convergència, el mallat ha d'ajustar-se al nivell de les àrees on els degradats son importants, és a dir, en les capes límits.

8.2.1. Capa límit dinàmica

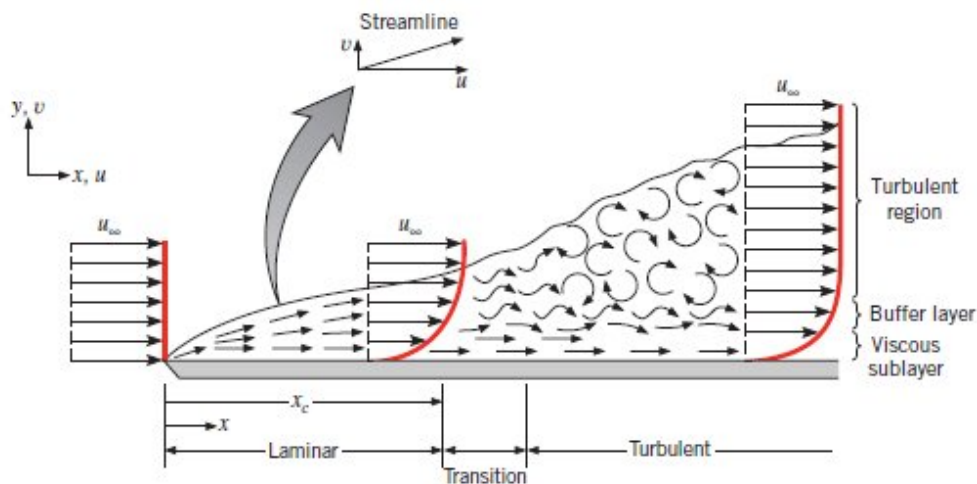


Figura 10: Capa límit dinàmica amb un Reynolds creixent. Font: (Banihani & El Haj Assad, 2018)

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot v_{\infty} \cdot D_h}{\mu} \quad \text{Eq. 55}$$

$$D_h = 4 \cdot \frac{V_{canal}}{A_{moll}} \quad \text{Eq. 56}$$

On segons la velocitat v_{∞} ens podem trobar en tres regions diferents:

- Laminar ($Re < 10^5$).
- Transició ($10^5 < Re < 10^6$).
- Turbulent ($Re > 10^6$).

Donat que normalment, es treballa amb velocitats molt baixes, considerarem que sempre ens trobem en règim laminar.

$$\delta = \frac{5L}{\sqrt{Re}} \quad \text{Eq. 57}$$

8.2.2. Capa límit tèrmica

$$\delta_t = \frac{\delta}{\sqrt[3]{Pr}} \quad \text{Eq. 58}$$

On el nombre de Prandtl equival:

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{(\mu/\rho)}{(k/\rho \cdot c_p)} \rightarrow Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad \text{Eq. 59}$$

D'aquesta manera es pot definir la mida mínima de malla que garanteixi una descripció correcte del gradient tèrmic.

- Nombre de Fourier de la malla: representa la difusió tèrmica.

$$Fo = \frac{\Delta t}{\tau_d} = \Delta t \frac{a}{p_m^2} \quad \text{Eq. 60}$$

- Nombre de Courant: representa la convecció.

$$Co = \frac{\Delta t}{\tau_c} = \Delta t \frac{v}{p_m} \quad \text{Eq. 61}$$

- Correlació de Nusselt:

$$Nu = 0.332 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad \text{Eq. 62}$$

8.2.3. ANSYS Meshing

Indiferentment dels dos prototips proposats per implementar en l'ANSYS, s'ha aplicat les sota les mateixes condicions:

- El fluid és una mescla d'aigua al 90% i la resta etanol. Es considera incompressible. I té les següents propietats:

$$\rho_f = 981 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{p,f} = 4330 \text{ J/kg} \cdot K$$

$$k_f = 0.52 \text{ W/m} \cdot K$$

$$\mu_f = 0.0016 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Donat que les pistons s'han ajustat per poder desplaçar la meitat del regenerador en un temps de 3 s. La velocitat es correspon:

$$v_{\infty} = 0.00\bar{6} \text{ m/s}$$

Amb aquestes dades podem saber la capa límit dinàmica i tèrmica per saber com han de ser l'alçada (eix y) de les cel·les a la interfície entre el sòlid i el líquid.

En aquestes condicions obtenim un $Re = 6.9509$ i $Pr = 13.323$, que donen un gruix de la capa límit dinàmica de $\delta = 76\mu\text{m}$ i un gruix de la capa límit tèrmica de $\delta_t = 32\mu\text{m}$.

Com podem veure la capa límit tèrmica és la més restrictiva, per tant, per assegurar les dues condicions ens cal una alçada de la cel·la de la interfície com a màxima de $32\mu\text{m}$.

Tal com s'indica en els annex E.5. la distància en el eix y es modifica dividint-lo en 7 trossos amb un factor Bias de valor 2, tant per el líquid com per el/s sòlid/s. Mesurant l'alçada de la cel·la més propera a la interfície ens dona un valor de $23\mu\text{m}$, assegurant-nos les condicions de la capa límit dinàmica i tèrmica.

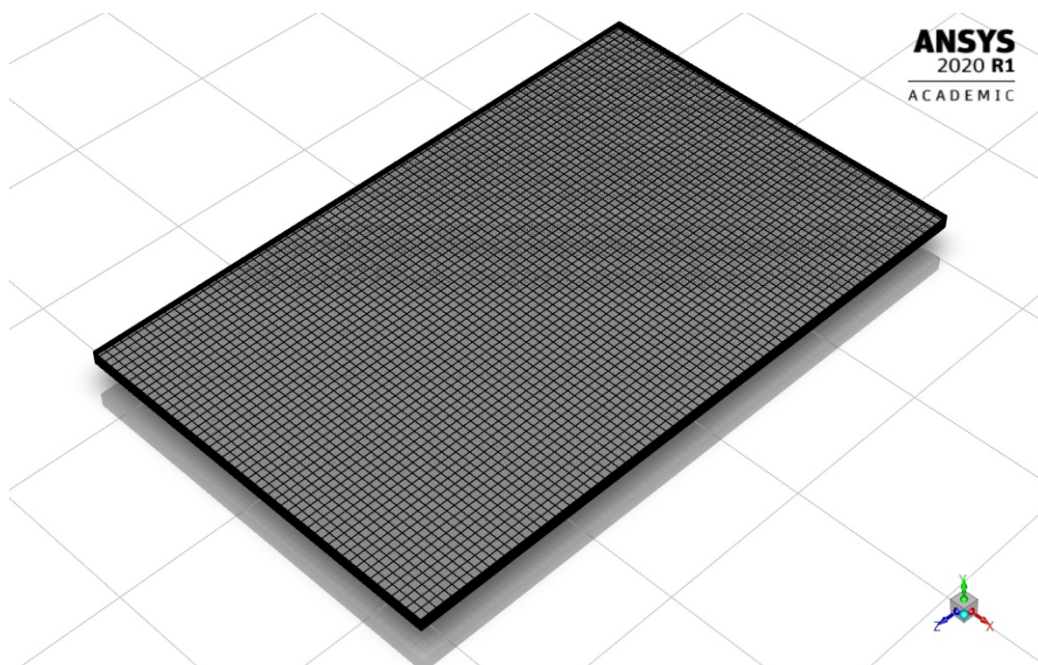


Figura 11: Geometria i mallat en vista isomètrica del prototip 1 en ANSYS Fluent. Font pròpia.

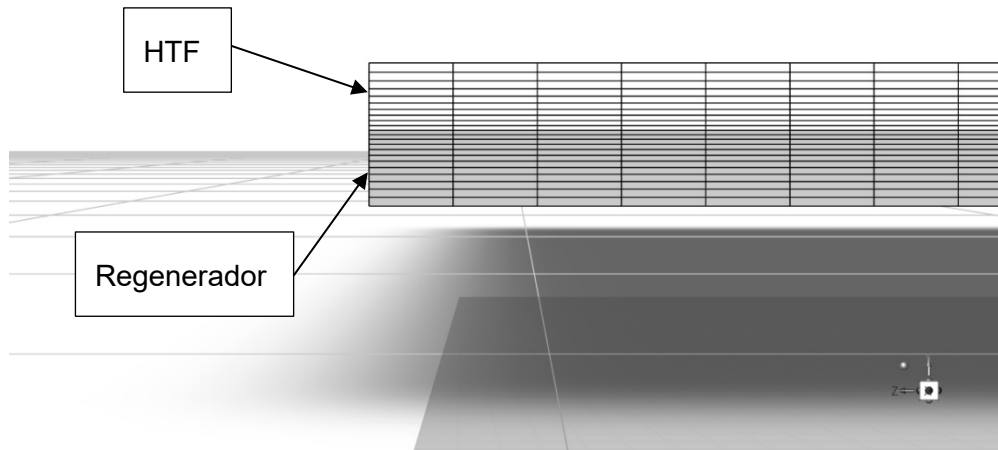


Figura 12: Perspektiva normal al eix +x del prototip 1 per aclarir el factor Bias. Font pròpia.

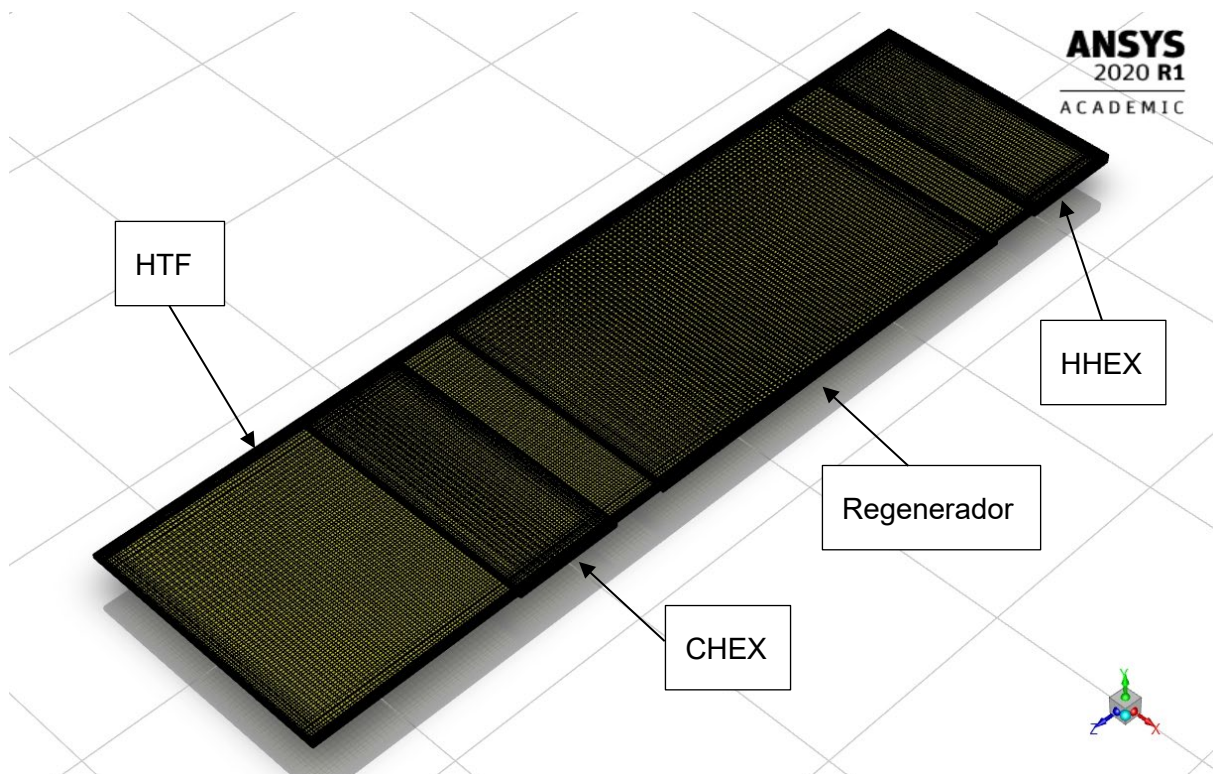


Figura 13: Geometria i mallat en vista isomètrica del prototip 2 en ANSYS Fluent. Font pròpia.

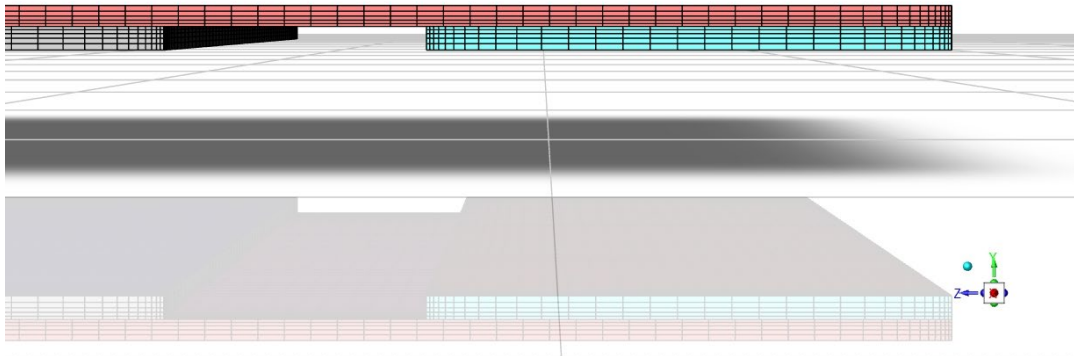


Figura 14: Perspectiva normal al eix $+x$ del prototip 2 per aclarir el factor Bias. Font pròpia.

8.3. Inicialització en ANSYS Fluent

Els UDF creats estan pensats per poder funcionar en paral·lel, és a dir, podem assignar en quants microprocessadors volem distribuir la càrrega computacional. En aquest cas es disposava de 6 nuclis de microprocessadors, donat que l'ordinador només s'utilitzaria per fer funcionar el programa, s'ha assignat 4 nuclis per treballar:

```
-----
ID      Hostname  Core  O.S.      PID      Vendor
-----
n3      fred370   4/6   Windows-x64  228828   Intel(R) Core(TM) i5-8400
n2      fred370   3/6   Windows-x64  200928   Intel(R) Core(TM) i5-8400
n1      fred370   2/6   Windows-x64  172640   Intel(R) Core(TM) i5-8400
n0*     fred370   1/6   Windows-x64  178448   Intel(R) Core(TM) i5-8400
host    fred370           Windows-x64  228536   Intel(R) Core(TM) i5-8400

MPI Option Selected: ibmmpi
Selected system interconnect: default
-----
```

Figura 15: Informació dels processadors que s'han utilitzar per la simulació dels prototips 1 i 2. Font pròpia.

És important, ja que influeix en la velocitat d'obtenció de resultats. Seguidament es comprova que el mínim volum del mallat no sigui negatiu.

```
Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = -1.250000e-02, max (m) = 1.250000e-02
  y-coordinate: min (m) = 0.000000e+00, max (m) = 8.500000e-04
  z-coordinate: min (m) = -3.500000e-02, max (m) = 5.500000e-02
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 1.936414e-13
  maximum volume (m3): 3.303546e-11
  total volume (m3): 1.575000e-06
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 3.237332e-09
  maximum face area (m2): 2.674115e-07
Checking mesh.....
Done.
```

Figura 16: Valors de la comprovació del mallat en ANSYS Fluent. Font pròpia.

I que la qualitat del mallat sigui l'acceptable:

```
Mesh Quality:
Minimum Orthogonal Quality = 9.99997e-01 cell 4122 on zone 6 (ID: 36808 on partition: 1) at location ( 9.78140e-03 2.71098e-04 3.49676e-02)
(To improve Orthogonal Quality, use "Inverse Orthogonal Quality" in Fluent Meshing,
where Inverse Orthogonal Quality = 1 - Orthogonal Quality)
Maximum Aspect Ratio = 1.31773e+01 cell 17242 on zone 8 (ID: 59885 on partition: 3) at location ( 9.01994e-03 4.77453e-04 5.16356e-02)
```

Figura 17: Valor de la qualitat del mallat en ANSYS Fluent. Font pròpia.

- La qualitat mínima ortogonal ha estat de 0.999997, és a dir, la qualitat és casi igual a la desitjable o l'òptim.
- La màxima relació d'aspecte ha estat de 13.1773, un valor no massa llunyà del valor recomanat pel manual de l'ANSYS Fluent de un rang de valors entre 18-20.

8.4. Condicions de contorn

Per implementar el prototip, s'ha hagut que associar certes zones de la geometria a condicions de contorn.

- Velocitat d'entrada: definició de la velocitat d'entrada i de la temperatura provinent dels intercanviadors de calor.
- Pressió de sortida: definir la pressió estàtica del fluid quan surt, normalment és zero per poder detectar possibles recirculacions del fluid.
- Paret: serveix per determinar l'espai del nostre domini o regió. Per defecte, es defineix com adiabàtica i ho mantindrem així.
- Simetria: s'utilitza quan el problema conté simetries planes o axials, i implica un gradient normal zero de qualsevol variable en la superfície:

La regió del fluid:

- Propietats del flux (els considerarem independents de la temperatura): $\rho_f, \mu_f, c_{p,f}, \lambda_f$.
- Temperatura inicial del fluid.

La regió del sòlid:

- Propietats del sòlid
 - o A temperatura constant: ρ_s, λ_s .
 - o En funció de la temperatura i el camp magnètic intern: $c_{p,s}$. S'introduirà amb un UDF.
- Temperatura inicial del sòlid.

La interfície entre el sòlid i el líquid:

- Condició de límit tèrmic acoblat, de manera que Fluent resol les transferències de calor directament de la solució de la cel·la adjacent.

$$\lambda_s \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{P,s} = \lambda_f \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{P,f} \quad \text{Eq. 63}$$

D'aquesta manera trobem el fenomen de conducció molt pròxim a la paret.

Normalment s'utilitzen aquestes condicions inicials i de contorn:

- La temperatura del fluid a l'entrada del costat calent i del costat fred del AMR estan pre-definits (basats en el focus de fred i focus calent o en les temperatures del fluid que han sigut excitats en el regenerador en el període anterior de bufat).

$$T_{f,h}(x = 0, t) = T_{f,h,in} \quad \text{Eq. 64}$$

$$T_{f,h}(x = L, t) = T_{f,h,in} \quad \text{Eq. 65}$$

- Les temperatures del regenerador a l'inici del cicle és la mateixa que el final de l'anterior.

$$T_{s,h}(x, t = \tau_f) = T_{s,c}(x, t = 0) \quad \text{Eq. 66}$$

$$T_{s,h}(x, t = 0) = T_{s,c}(x, t = \tau_f) \quad \text{Eq. 67}$$

- Normalment, els extrems es consideren tèrmicament aïllats.

$$\left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad \text{Eq. 68}$$

Per fer servir l'UDF primer s'ha de reservar tres UDM¹⁰ on la primera (C_UDMI amb i=0) farà referència a la calor específica calculada per cada valor de temperatura, independentment de si l'EMC succeeix de manera progressiva (model 2) o instància (model 4); el segon UDM (C_UDMI amb i=1) farà referència a la temperatura calculada, útil pel debug del codi pel regenerador, i per últim, el tercer UDM (C_UDMI amb i=2) pel càlcul de l'EMC com a font de calor volumètrica per implementar en l'equació de l'energia del regenerador.

Caldrà fer modificacions en l'UDF si es tracta d'un material diferent del Gadolini, a més, l'ID que es marca en el codi ha de ser el mateix per l'assignat en el ANSYS Fluent pel cas del regenerador, donat que serà el que manifesti l'EMC.

¹⁰ "User-Defined Memory".

8.5. Desmagnetització del material

Quan apliquem un camp magnètic a un material magnètic com ho es el gadolini, no obtenim la densitat magnètica es correspon exactament a la del camp magnètic aplicat i això depèn molt de la orientació del camp magnètic amb el material, la temperatura i la intensitat de camp magnètic.

$$B = H - N_d \cdot M(H, T) \quad \text{Eq. 69}$$

On N_d representa el factor de desmagnetització que dependrà de geometria i de la orientació respecte el camp magnètic aplicat. Aquest factor l'obtindrem de la fórmula (Aharoni, 1998) o mitjançant la pàgina web¹¹, que al ser una constant per cada dispositiu es pot calcular prèviament.

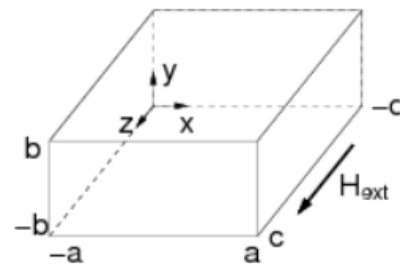


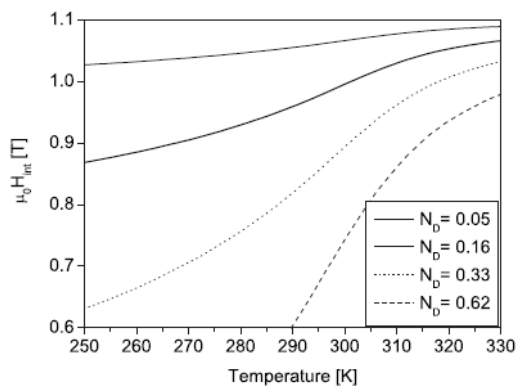
Figura 18: Representació de les dimensions en els seus eixos i la orientació del camp. Font: (Aharoni, 1998)

$$\begin{aligned} \pi D_z = & \frac{b^2 - c^2}{2bc} \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} - a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} + a} \right) + \frac{a^2 - c^2}{2ac} \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} - b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} + b} \right) + \frac{b}{2c} \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2} + a}{\sqrt{a^2 + b^2} - a} \right) + \frac{a}{2c} \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + b^2} + b}{\sqrt{a^2 + b^2} - b} \right) \\ & + \frac{c}{2a} \ln \left(\frac{\sqrt{b^2 + c^2} - b}{\sqrt{b^2 + c^2} + b} \right) + \frac{c}{2b} \ln \left(\frac{\sqrt{a^2 + c^2} - a}{\sqrt{a^2 + c^2} + a} \right) + 2 \arctan \left(\frac{ab}{c\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right) + \frac{a^3 + b^3 - 2c^3}{3abc} \\ & + \frac{a^2 + b^2 - 2c^2}{3abc} \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} + \frac{c}{ab} (\sqrt{a^2 + c^2} + \sqrt{b^2 + c^2}) - \frac{(a^2 + b^2)^{3/2} + (b^2 + c^2)^{3/2} + (c^2 + a^2)^{3/2}}{3abc} \end{aligned}$$

Figura 19: Equació per el càlcul del factor de desmagnetització adreçat com D_z . Font: (Aharoni, 1998).

La magnetització ve donada per l'equació (). Donat un valor de intensitat de camp magnètic, la magnetització ve fixada per la temperatura; com ja sabem, a menys temperatura, més alta és la magnetització i per tant, pren més importància a temperatures més baixes, ja que la densitat de camp magnètica serà més petit que l'aplicat.

¹¹ <http://www.magpar.net/static/magpar/doc/html/demagcalc.html>



En la gràfica 24 podem veure N_d pel cas de (Bahl, Petersen, Pryds, & Smith, 2008). El primer i el tercer N_d fa referència a 1 sola placa orientada en paral·lel i en perpendicular al camp magnètic aplicat, respectivament. El segon i el quart N_d fan referència a 13 plaques orientades en paral·lel i en perpendicular al camp magnètic aplicat, respectivament.

Gràfica 29: Dependència del camp magnètic intern amb la temperatura, sotmès a un camp magnètic 1.1T. Font: (Bahl & Nielsen, 2009)

8.6. Resultats pels dos prototips

Pels dos prototips hem realitzat 10^5 nombres de intervals amb un interval de 0.01 segons. Excepte en determinats casos en el prototip 1, on a final de cada cicle el programa col·lapsava, de manera que a l'UDF havíem introduït un interval

❖ Prototip 1:

En les següents figures es mostren els resultats de la perfil de temperatura en el sentit de flux pel primer cicle, excepte la última figura. No es mostra el perfil de velocitat, donat que podria portar confusió en la fase de bufat en calent, ja que aquell diagrama representa la magnitud de la velocitat i no la seva direcció i sentit.

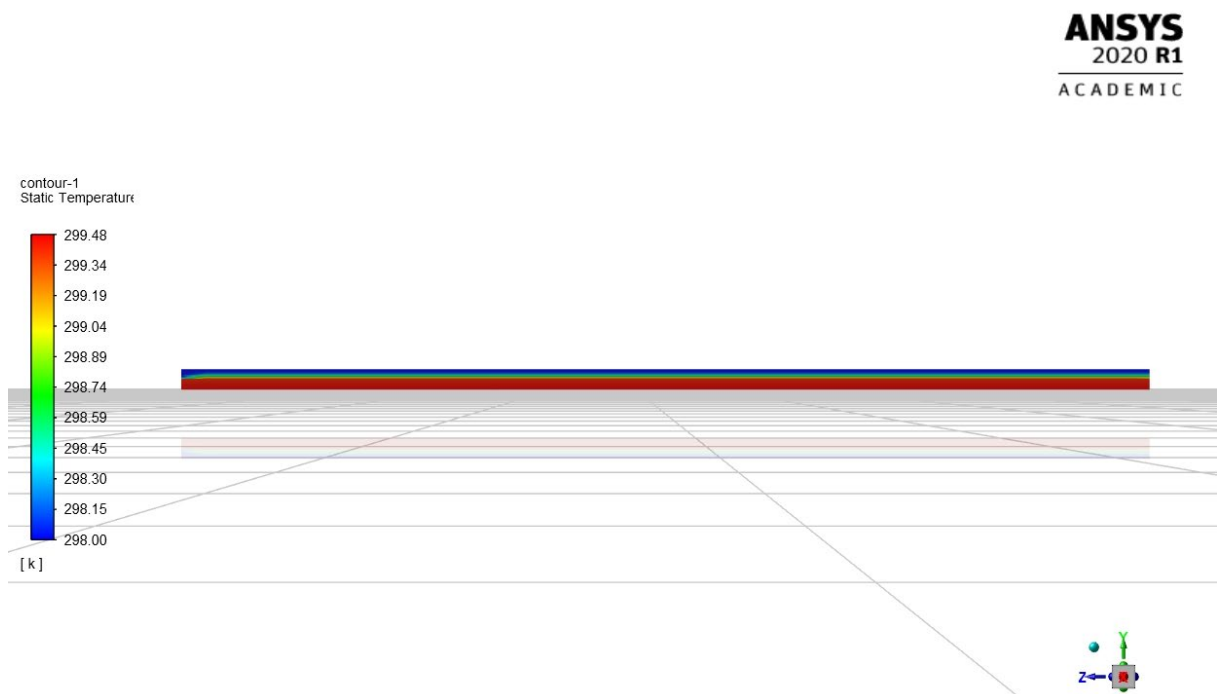


Figura 20: Perfil de temperatura després de la magnetització instantània. Font pròpia.

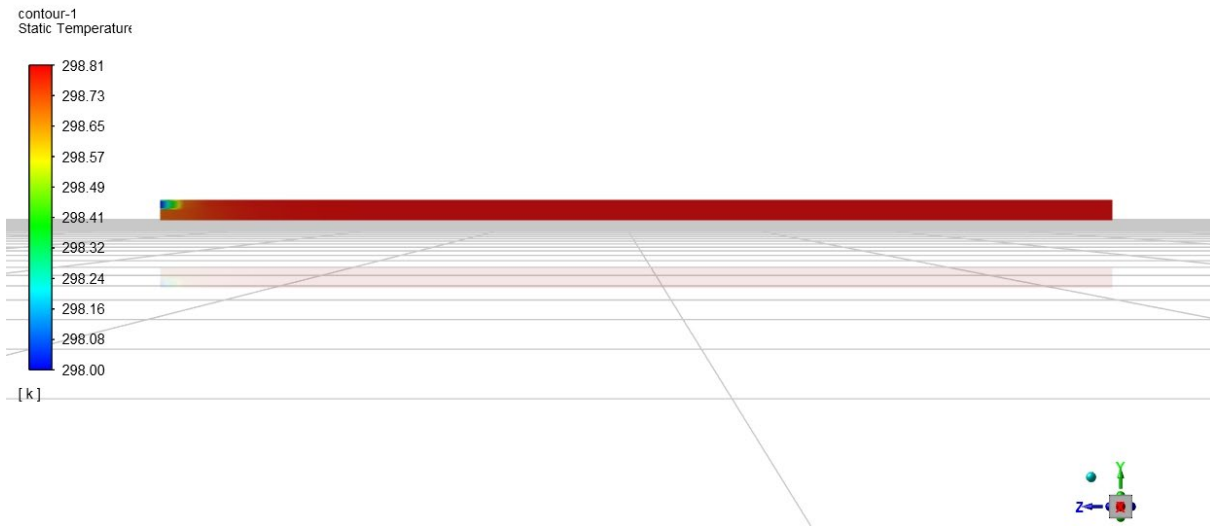


Figura 21: Perfil de temperatura quan un equilibri tèrmic. Font pròpia.

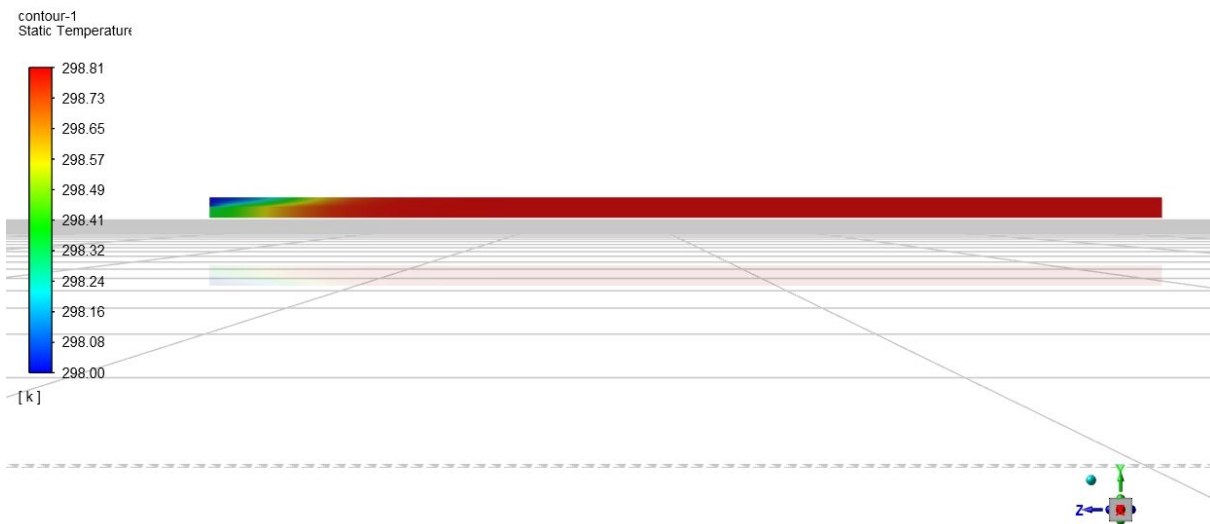


Figura 22: Perfil de temperatura als 0.2 segons d'haver començat el bufat.

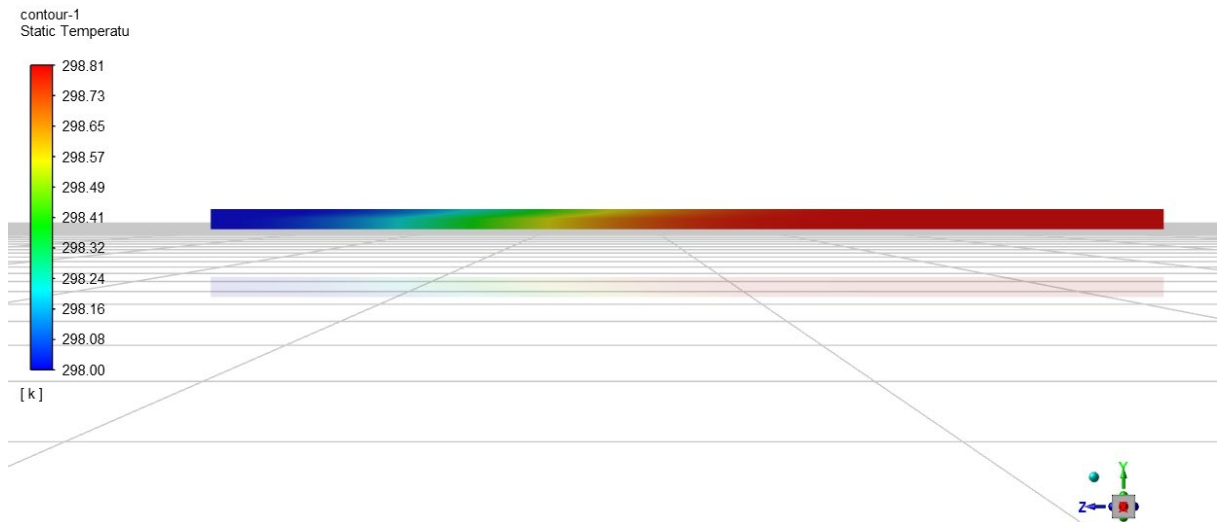


Figura 23: Perfil de temperatura quan acaba el període de bufat en fred. Font pròpia.

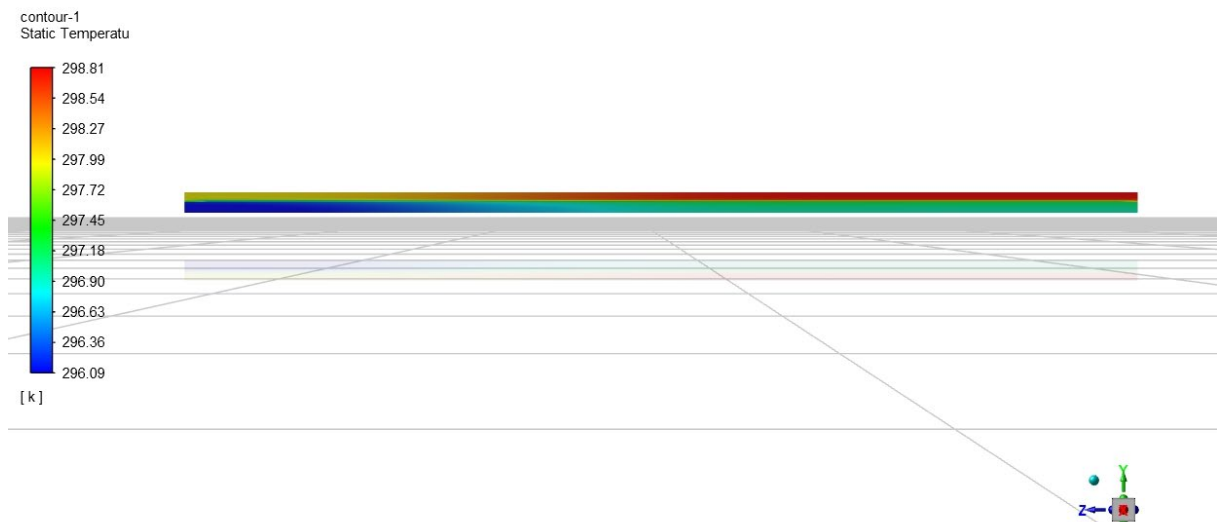


Figura 24: Perfil de temperatura un cop acabat la desmagnetització instantània. Font pròpia.

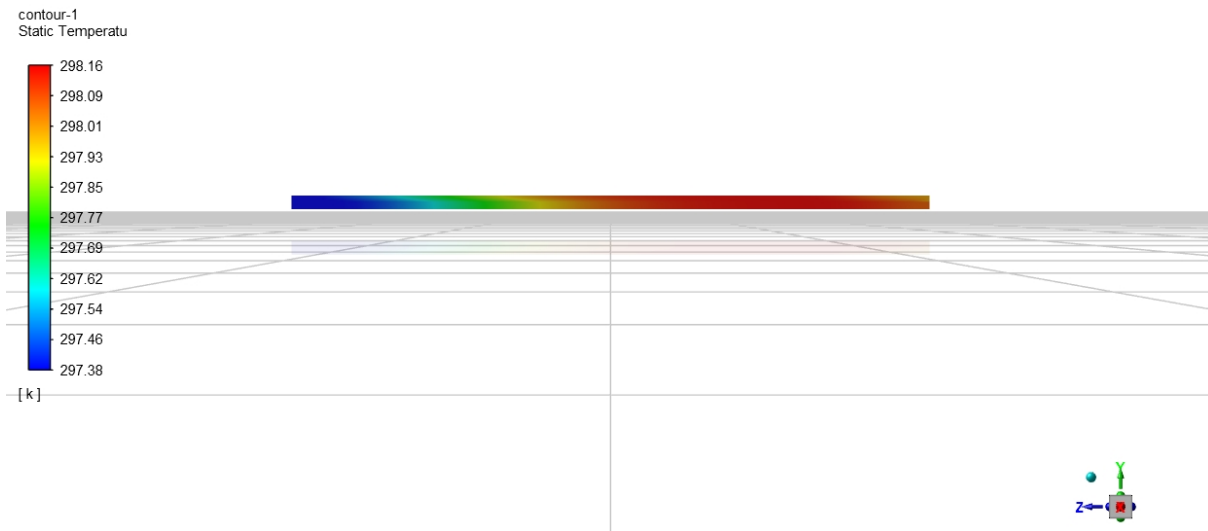


Figura 25: Perfil de temperatura per el final del primer cicle. Font pròpia.

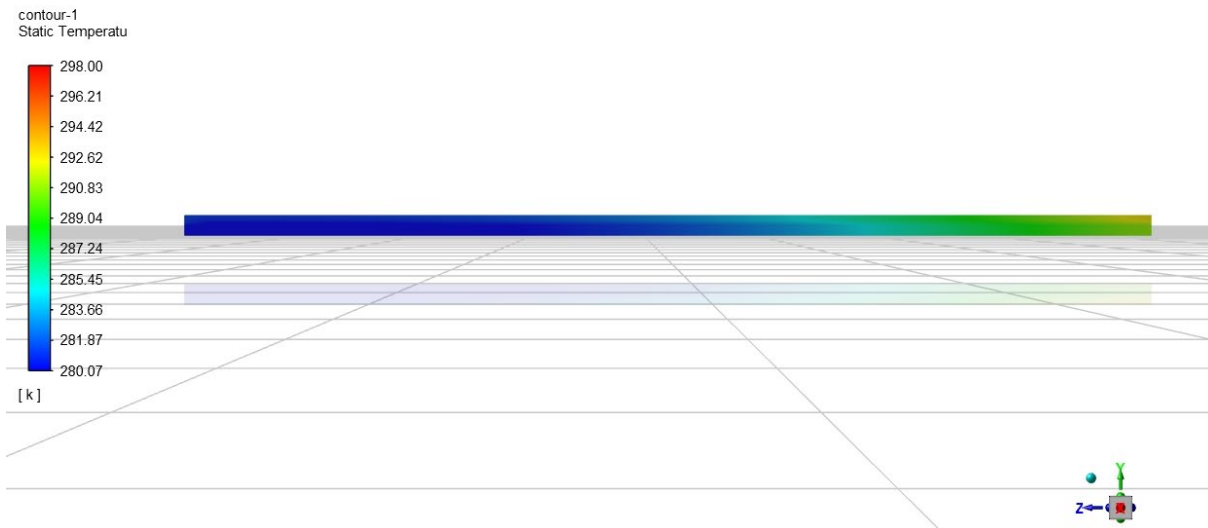


Figura 26: Perfil de temperatura per final del cicle 44. Font pròpia.

Podem observar que la diferència de temperatura és molt gran, i es degut a un error en l'UDF, en concret en el perfil de temperatura d'entrada, ja només guarda la temperatura de l'àrea d'entrada i no tot el volum refredat, que al tractar-se d'un gradient, serà diferent per cada cel·la.

❖ Prototip 2:

En les següents imatges podem comprovar el funcionament de l'EMC en cadascuna de les fases i el moviment relatiu del mallat del HTF.

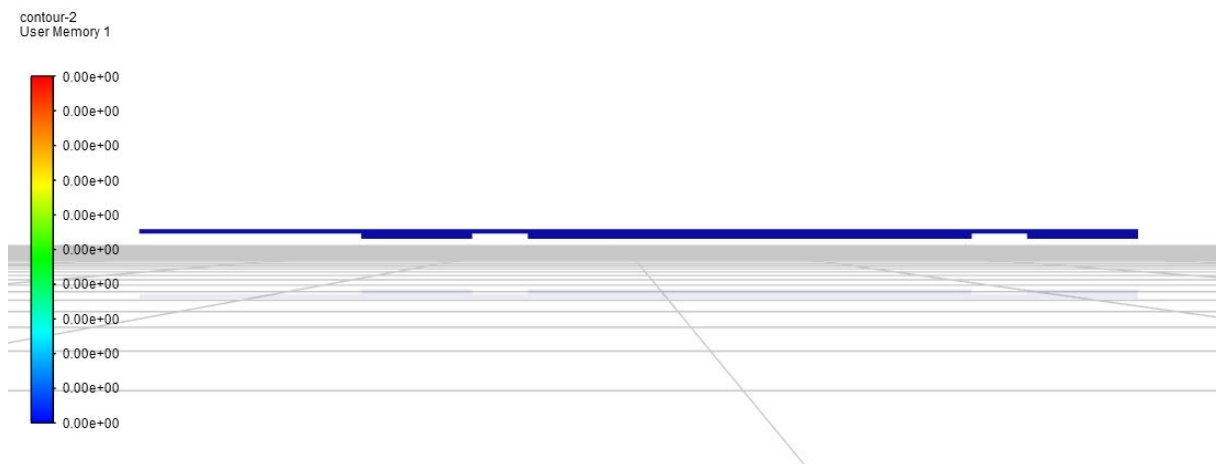


Figura 27: Representació de l'UDMI(1), és a dir, de la ΔT_{ad} a l'inici del cicle. Font pròpia.

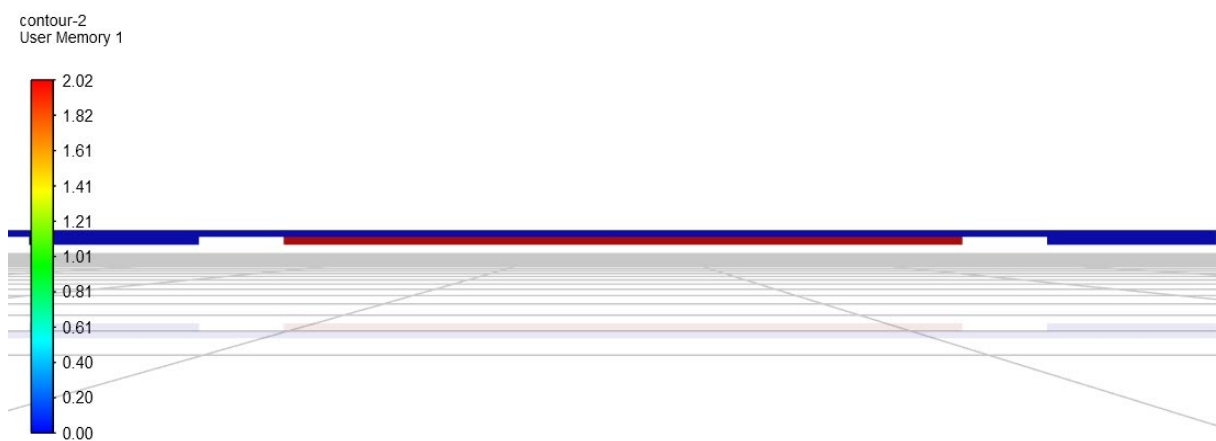


Figura 28: Representació de l'UDMI(1), és a dir, de la ΔT_{ad} després de la magnetització instantània. Font pròpia.

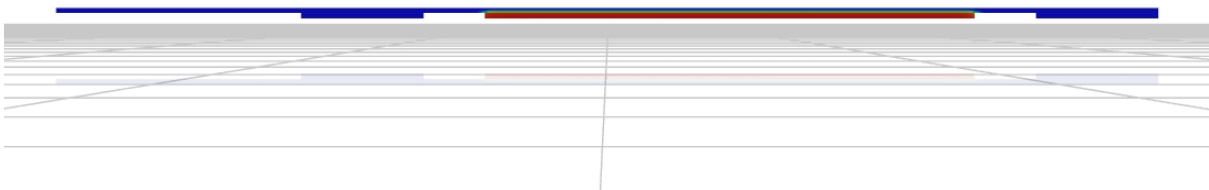
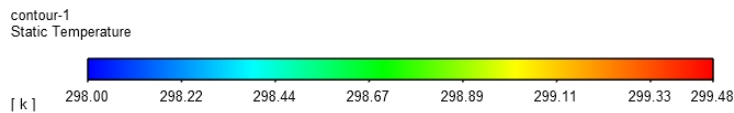


Figura 29: Representació del perfil de temperatura després de la magnetització instantània. Font pròpia.

En les imatges anteriors podem observar que els càlculs realitzats en el UDF reflecteixen els resultats desitjats en la temperatura. Cal dir que, que la figura 28 té lloc en el primer interval de temps, la figura 27 té lloc en el següent interval de temps i la figura 29 és la temperatura 8 intervals després, tenim una temperatura més baixa degut que hi ha passat 0.08s des de la magnetització instància i per tant, ja hi hagut un intercanvi de calor amb el fluid.

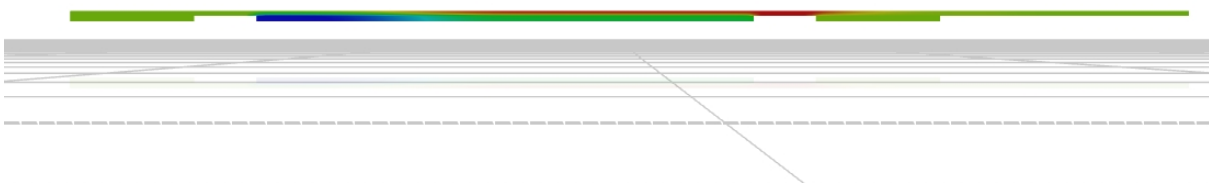
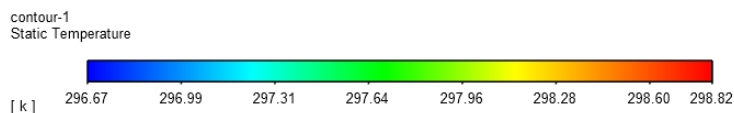


Figura 30: Representació del perfil de la temperatura un cop acabat el període de bufat en fred i la desmagnetització instantània. Font pròpia.

De la mateixa manera podem veure en la figura 30, on s'aprecia un gradient de temperatura en el regenerador.

En la figura 31, s'observa la calor específica, en aquest cas del fluid, del CHEX i del regenerador. Tenint en compte que la calor específica del regenerador serà diferent per cada cel·la en funció del camp magnètic i la temperatura a la qual es trobi.

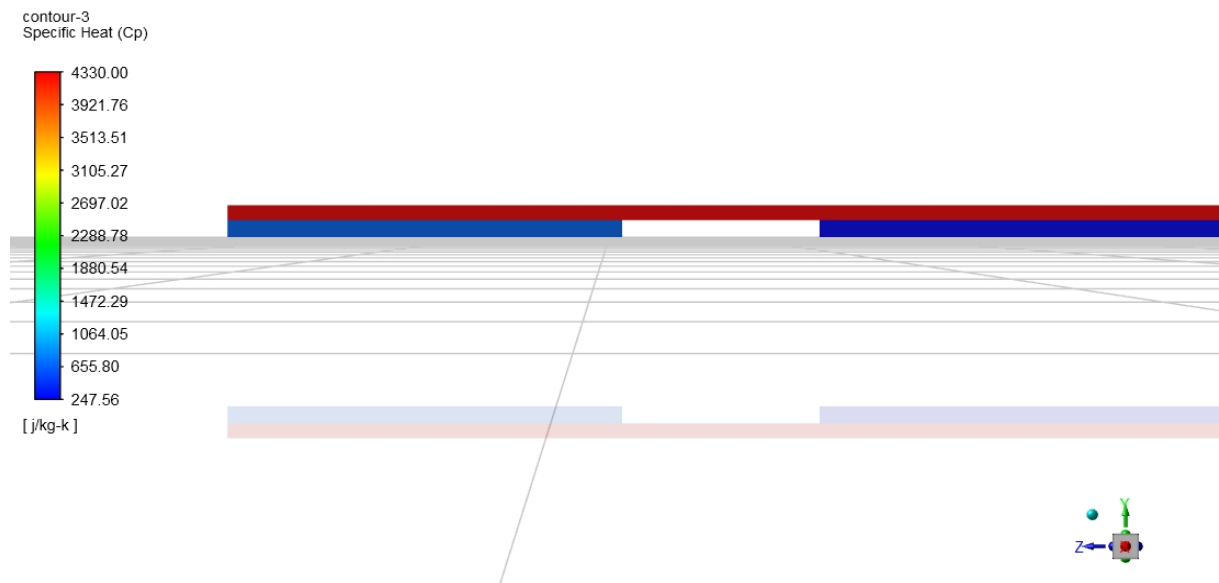


Figura 31: Calor específica del regenerador, HTF i CHEX. Font pròpia.

9. Conclusions

Durant el treball, s'han estudiat diferents models que han sigut implementats en *COMSOL Multiphysics* o *ANSYS Fluent* i verificat amb les mateixes dades experimentals. S'han comparat els càlculs amb dades experimentals del gadolini per tal de estudiar l'ajustament de cada model, tot i que provenien de la mateixa teoria utilitzaven diferents mètodes amb formules lleugerament modificades. Finalment s'ha vist que el model 4 s'ajustava millor a les dades experimentals, sobretot pel gadolini més pur.

El prototip que s'ha estudiat aquí es un cicle AMR basat en Brayton amb un disseny compacte i amb unes dades més concretes que altres treballs estudiats, facilitant la implementació en el programa. Tot i així, finalment, s'han definit dos tipus de prototips.

El primer donava resultats més ràpids però no arribava mai al estadi estacionari, degut a que la condició d'entrada corresponia a valors d'aquesta superfície quan es guardaven les dades, per tant l'error estava en que el programa considerava que més volum havia estat refredat en aquella temperatura.

Per evitar aquest problema, es va plantejar un segon prototip considerant la velocitat d'entrada com el moviment d'un volum tancat. S'observa que el perfil de temperatura és més adient, però s'haurien d'estudiar les conseqüències de no tenir una capa límit dinàmica, ja que es considera que tot el fluid en el seu conjunt és mou exactament a la mateixa temperatura; segurament a altes revolucions seria un problema.

Tot i que l'objecte d'aquest treball era fer un estudi sobre la refrigeració magnètica i implementar-la al ANSYS, no s'ha pogut obtenir un resultat final doncs la simulació per saber si el prototips 2 arriba a l'estat estacionari supera el límit d'entrega d'aquest treball.

Malgrat que el gadolini és un material molt estudiat, hem vist que els seus recursos son escassos en comparació de la demanda esperada en els propers anys. Així que es recomana investigar la simulació d'altres materials i dispositius més eficients.

10. Bibliografia

- Aharoni, A. (1998). Demagnetizing factor for rectangular ferromagnetic prisms. *Journal of Applied Physics* 83 (6), 3432.
- Akis, T., Hamad, A., Ezan, M. A., Yanik, E., Yilanci, A., Celik, S., & Ekren, O. (2020). Numerical analysis of magnetic field and heat transfer of a reciprocating magnetocaloric regenerator using a Halbach magnet array. *Journal of Heat Transfer* 142, 092103-1.
- ANSYS Inc. (2010). *Maxwell 2D v14*. Canonsburg.
- ANSYS, Inc. (2013). *ANSYS Fluent UDF Manual v.15*. Canonsburg.
- ANSYS, Inc. (2018). *ANSYS Fluent User's Guide v19.2*. Canonsburg.
- Bahl, C., & Nielsen, K. (2009). The effect of demagnetization on the magnetocaloric properties of gadolinium. *Journal of Applied Physics* 105, 013916.
- Bahl, C., Petersen, T. F., Pryds, N., & Smith, A. (2008). A versatile magnetic refrigeration test device. *Review of Scientific Instruments* 79, 093906.
- Banihani, E., & El Haj Assad, M. (2018). Boundary-layer theory of fluid flow past a flat-plate: Numerical solution using MATLAB. *International Journal of Computer Applications* 180 (18).
- Bouchard, J., Nesreddine, H., & Galanis, N. (2009). Model of a porous regenerator used for magnetic refrigeration at room temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52, 1223-1229.
- Boucekara, H., & Nahas, M. (2015). Magnetic Refrigeration technology at room temperature. *Trends in Electromagnetism - From fundamentals to applications*.
- Burdyny, T., Arnold, D. S., & Rowe, A. (2014). AMR thermodynamics: Semi-analytic modeling. *Cryogenics* 62, 177-184.
- Coulomb, D., Dupont, J. L., & Pichard, A. (2015). The role of Refrigeration in the Global Economy. *29th Informatory Note on Refrigeration Technologies* (p. 1-16). Paris, France: International Institute of Refrigeration.
- Dan'kov, S. Y., Tishin, A. M., Pecharsky, V. K., & Gschneidner Jr., K. A. (1998). Magnetic phase transition and the magnetothermal properties of gadolinium. *Physical review B* 57 (6), 3478-3490.

- Engelbracht, K., Tusek, J., Kitanovski, A., Bahl, C. R., & Poredos, A. (2013). Improved modelling of a parallel plate active magnetic regenerator. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46, 255002 (11pp).
- Engelbrecht, K., Tusek, J., Nielsen, K. K., Kitanovski, A., Bahl, C., & Poredos, A. (2013). Improved modelling of a parallel plate active magnetic regenerator. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46, 255002 (11pp).
- Ezan, M. A., Ekren, O., Metin, C., Yilance, A., Biyik, E., & Kara, S. M. (2017). Numerical analysis of a near-room-temperature magnetic cooling system. *International Journal of Refrigeration* 75, 262-275.
- Franco, V., Blázquez, J. S., Ingale, B., & Conde, A. (2012). The Magnetocaloric Effect and Magnetic Refrigeration near room temperature: Materials and Models. *The Annual Review of Materials Research* 42, 305-342.
- 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 devces. *Progress in Materials Science* 93, 112-232.
- Ghahremani, M., Seyoum, H. M., ElBidweihy, H., Della Torre, E., & Bennett, L. H. (2012). Adiabatic magnetocaloric temperature change in polycrystalline gadolinium - A new approach highlighting reversibility. *AIP Advances* 2, 032149.
- Gutfleisch, O., Willard, M. A., Brück, E., Chen, C. H., Sankar, S. G., & Liu, J. P. (2011). Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. *Advanced materials* 23, 821-842.
- Hamdani, K., & Smaili, A. (2016). Multidimensional numerical method for method performance predictions of an AMR cycle using ANSYS Fluent Software. *7th International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature (Thermag VII)* (p. 0243). Turin, Italy.: IIF IIR.
- Jabbari, M., Spangenberg, J., & Hattel, J. (2013). Modeling of the interface behavior in tape casting of functionally graded ceramics for magnetic refrigeration parts. *Applied Mechanics and Materials* 36, 2403-2409.
- Kamran, M. S., Ansari, M. Q., Ali, H., Shah, F. H., Zhang, H., Long, Y., & Wang, H. S. (2015). Performance evaluation of room temperature magnetic refrigerator using corrugated plate regenerator. *14th UK Heat Transfer Conference*.

- Kamran, M. S., Sun, J., Tang, Y. B., Chen, Y. G., Wu, J. H., & Wang, H. S. (2016). Numerical investigation of room temperature magnetic refrigerator using microchannel regenerators. *Applied Thermal Engineering*, 1126-1140.
- Kitanovski, A. (2020). Energy application of magnetocaloric materials. *Advanced Energy Materials* 10, 201903741.
- Kitanovski, A., Plaznik, U., Tomc, U., & Poredos, A. (2015). Present and future caloric refrigeration and heat-pump technologies. *International Journal of Refrigeration* 57, 288-298.
- Legait, U. (2011). *Caractérisation et modélisation magnétothermique appliquée à la réfrigération magnétique*. Francia: HAL Université de Grenoble.
- Lionte, S., Vasile, C., & Siroux, M. (2015). Numerical analysis of a reciprocating active magnetic regenerator. *Applied Thermal Engineering* 75, 871-879.
- Lorenz, L., & Kevlishvili, N. (2017). Designing of Halbach cylinder based magnetic assembly for a rotating magnetic refrigerator. Part 1: Designing procedure. *International Journal of Refrigeration* 73, 246-256.
- Nielsen, K. K., Bahl, C., Smith, A., Bjork, R., Pryds, N., & Hattel, J. (2009). Detailed numerical modeling of a linear parallel-plate Active Magnetic Regenerator. *International Journal of Refrigeration* 32, 1478-1486.
- Nielsen, K. K., Tusek, J., Engelbrecht, K., Schopfer, S., Kitanovski, A., Bahl, C., . . . Poredos, A. (2011). Review on numerical modeling of active magnetic regenerator for room temperature applications. *International Journal of Refrigeration* 34, 603-616.
- Niknia, I., Campbell, O., Christiaanse, T. V., Govindappa, P., Teyber, R., Trevizoli, P. V., & Rowe, A. (2016). Impacts of configuration losses and active magnetic refrigeration device performance. *Applied Thermal Engineering* 106, 601-612.
- Petersen, T. F., Pryds, N., Smith, A., Hattel, J., Schmidt, H., & Knudsen, H.-J. H. (2008). Two-dimensional mathematical model of a reciprocating room-temperature Active Magnetic Regenerator. *International Journal of Refrigeration* 31, 432-443.
- Ram, N. R., Prakash, M., Naresh, U., Kumar, N. S., Sarmash, T. S., Subbarao, T., . . . Naidu, K. C. (2018). Review on magnetocaloric effect and materials. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 31, 1971-1979.

- Risser, M., Vasile, C., Keith, B., Engel, T., & Muller, C. (2012). Construction of consistent magnetocaloric materials data for modelling magnetic refrigerators. *International Journal of Refrigeration* 35, 459-467.
- Roudault, J., Kedous-Lebouc, A., Yonnet, J. P., & Muller, C. (2011). Numerical analysis of an Active Magnetic Regenerator. *International Journal of Refrigeration* 34, 1797-1804.
- Rowe, A. (2011). Configuration and performance analysis of magnetic refrigerators. *International Journal of Refrigeration* 34, 168-177.
- Russek, S. L., & Zimm, C. B. (2006). Potential for cost effective magnetocaloric aire conditioning systems. *International Journal of Refrigeration* 29, 1366-1373.
- Silva, D. J., Amaral, J. S., & Amaral, V. S. (2019). Cooling by sweeping: A new operation method to achieve ferroic refrigeration without fluids or thermally switchable components. *International Journal of Refrigeration* 101, 98-105.
- Tagliafico, G., Scarpa, F., & Canepa, F. (2010). A dynamic 1-D model for a reciprocating active magnetic regenerator; influence of the main working parameters. *International Journal of Refrigeration* 33, 286-293.
- Yu, B., Liu, M., Egolf, P. W., & Kitanovski, A. (2010). A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010. *Internal Journal of Refrigeration* 33, 1029-1060.