



Conference: Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables -  
Mantenimiento Industrial - Mecatrónica e Informática

*Booklets*



**RENIECYT**  
Registro Nacional de Instituciones  
y Empresas Científicas y Tecnológicas

2015-20795

**CONACYT**

RENIECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA UNIVERSIA - E-Revistas - Google Scholar  
DOI - REBID - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID

**Title:** Caracterización de efecto magnéto-calórico del gadolinio para su implementación en sistemas de refrigeración

**Author:** Jesús HERNÁNDEZ MANDUJANO

**Editorial label ECORFAN:** 607-8324  
**BCIERMIMI Control Number:** 2017-02  
**BCIERMIMI Classification (2017):** 270917-0201

**Pages:** 33  
**Mail:**

**RNA:** 03-2010-032610115700-14

**ECORFAN-México, S.C.**  
244 – 2 Itzopan Street  
La Florida, Ecatepec Municipality  
Mexico State, 55120 Zipcode  
Phone: +52 1 55 6159 2296  
Skype: ecorfan-mexico.s.c.  
E-mail: contacto@ecorfan.org  
Facebook: ECORFAN-México S. C.

**Twitter:** @EcorfanC

[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

**Holdings**

Bolivia	Honduras	China	Nicaragua
Cameroon	Guatemala	France	Republic of the Congo
El Salvador	Colombia	Ecuador	Dominica
<b>Peru</b>	<b>Spain</b>	<b>Cuba</b>	<b>Haití</b>
Argentina	Paraguay	Costa Rica	Venezuela
Czech Republic			

# RESUMEN

La Refrigeración magnética es una de las tecnologías con mayor potencial por sus ventajas ambientales y energéticas frente a los sistemas convencionales. Este artículo presenta los aspectos termodinámicos más importantes del efecto magneto-calórico, fundamental en el estudio de las transformaciones magnéticas y el desarrollo de la refrigeración magnética.

- REFRIGERACIÓN MAGNÉTICA
- EFECTO MAGNETOCALÓRICO
- MATERIALES MAGNÉTICO.
- CARACTERIZACION DEL EFECTO MAGNETO-CALORICO PARA EL GADOLINIO

# INTRODUCCIÓN

**REFRIGERACIÓN MAGNÉTICA:** Es una avanzada técnica que permitirá en un futuro reemplazar los refrigeradores tradicionales y con esto contribuir a la reducción de la contaminación.

**EFEECTO MAGNETOCALÓRICO:** Es la capacidad que tiene un cuerpo para cambiar su temperatura por medio de un campo magnético.

**MATERIALES MAGNÉTICOS:** El material magnético es aquel que en el funcionamiento de la refrigeración magnética se calienta. Algunos de los materiales de esta clase que resultan más prometedores para esta función son aleaciones metálicas.

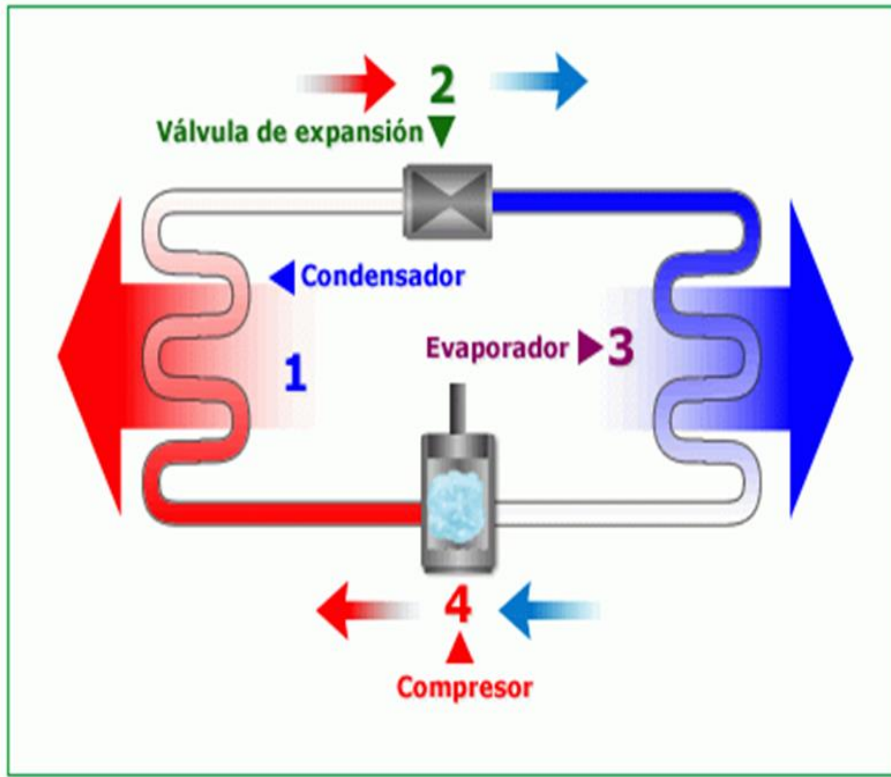
Existen dos tipos de refrigeración.



## ¿CÓMO FUNCIONA UN REFRIGERADOR CONVENCIONAL?

La idea principal del refrigerador es extraer el calor que hay en su interior hacia afuera. Es decir, enfocamos la operación de enfriar el recipiente, mediante la extracción del calor de su interior. De esta forma los alimentos de la nevera se mantienen a una temperatura determinada.

## ¿CÓMO SE LLEVA A CABO EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE CALOR?



- Un frigorífico consiste en un circuito cerrado (es decir, una “tubería” por la que circula un fluido) formado por dos serpentines (tubo en forma espiral). Estos dos serpentines, cuya misión será condensar y evaporar un fluido, están colocados entre sí mediante un compresor y una válvula de expansión.

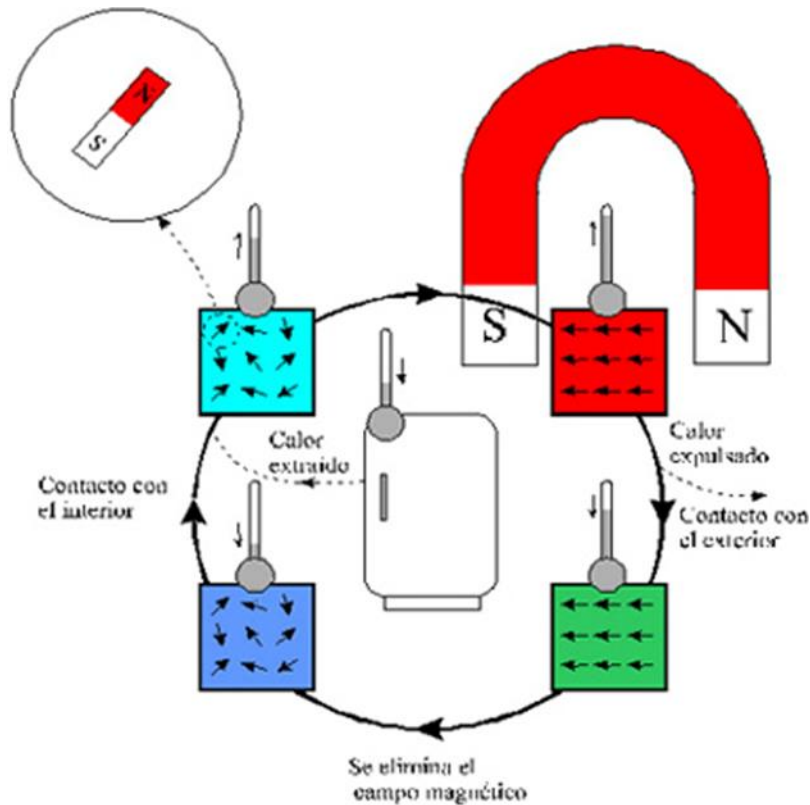
# REFRIGERADORES CONVENCIONALES Y EL MEDIO AMBIENTE

- Los gases refrigerantes son refrigerantes químicos que se condensan a gran presión, pero tienen puntos de evaporación bajos. Históricamente, varios gases se han utilizado en los refrigeradores. Muchos de estos productos químicos se han eliminado, ya sea porque sus gases tienen el potencial de emitir cloro que agotan el ozono o porque las sustancias que contienen los componentes podrían contribuir al calentamiento global. Los primeros refrigerantes también fueron menos que ideales porque eran hidrocarburos derivados del petróleo crudo no sostenible.
- Clorofluorocarbonos o CFC son derivados de los hidrocarburos saturados.
- El gas de hidrofurocarbono o HFC, reemplazó al CFC.
- El refrigerador convencional consume un 20% a un 30% más que un refrigerador magnético.



# REFRIGERACIÓN MAGNÉTICA

- La refrigeración magnética, aprovecha el efecto magneto-calórico (MCE) para reemplazar los procesos de compresión y expansión de los sistemas convencionales por procesos de magnetización y des-magnetización de un material magneto-calórico.
- En la refrigeración magnética se emplea un fluido que transfiere la energía entre el refrigerante magnético y los depósitos.
- La manifestación del efecto magneto-calórico como un cambio de entropía isotérmico o un cambio de temperatura adiabático, permite obtener diferentes ciclos termodinámicos



- Primero aplicamos un campo magnético los momentos magnéticos se alinean con el campo externo y el material se calienta.
- A través del contacto térmico con el exterior y manteniendo el campo externo, el material se enfría hasta la temperatura ambiente.
- Después suprimimos repentinamente el campo: los momentos se desalinean y el material se enfría. Se alcanza una temperatura más baja que la ambiental.
- El material se pone en contacto térmico con el objeto que queremos enfriar, simbolizado por un frigorífico.
- El objeto se enfría y el material se calienta hasta que ambos alcanzan una temperatura de equilibrio, inferior a la que tenía el objeto.



# TERMODINÁMICA EN EL EFECTO MAGNETOCALÓRICO

Los sistemas de refrigeración magnética aprovechan el cambio en la entropía de un material debido a la variación de parámetros externos, magnetización para producir frío.

Este fenómeno es conocido como: Efecto Magneto-calórico (MCE)

## ¿CUÁNDO AUMENTA O DISMINUYE LA ENTROPÍA DE UN MATERIAL FERROMAGNÉTICO?

La magnetización y des-magnetización del material ferromagnético, a temperaturas cercanas a la temperatura de transformación magnética, favorecen el carácter reversible del proceso debido a los continuos cambios en el orden magnético.

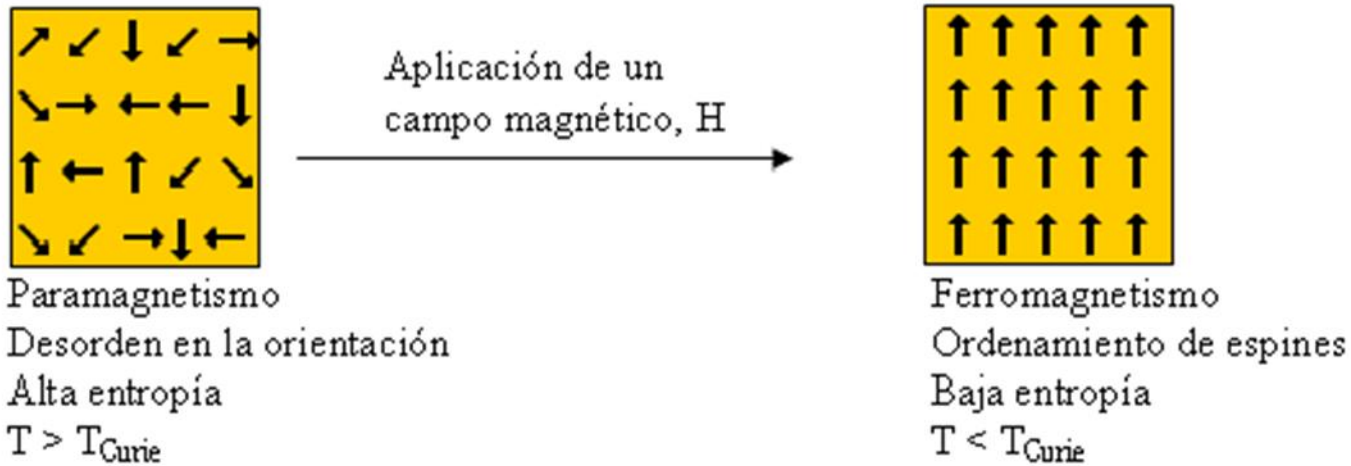
Se manifiesta en dos formas:

- En un proceso adiabático
- En un proceso no adiabático

Tipos:

- MCE convencional
- MCE gigante

La entropía del material depende de la temperatura y la intensidad magnética.

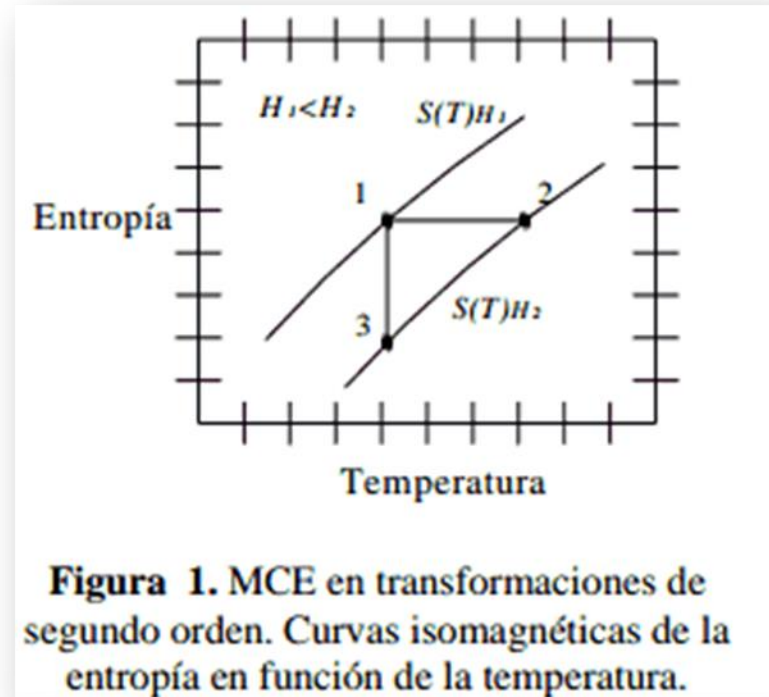


$$dS(T, H) = \left(\frac{\partial S(T, H)}{\partial T}\right) dT + \left(\frac{\partial S(T, H)}{\partial H}\right) dH \dots (1)$$

# MCE convencional

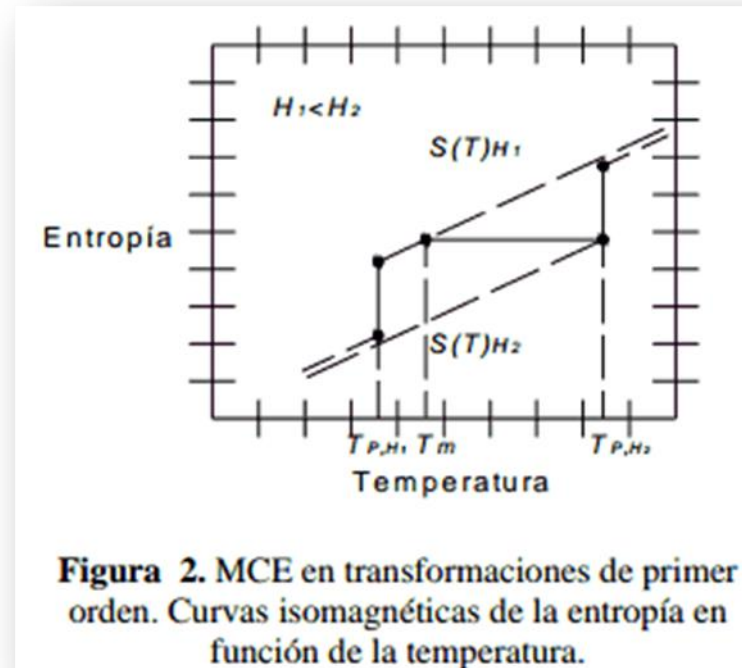
Proceso 1-2: En un proceso adiabático: disminuye la entropía magnética, aumenta la entropía de retícula causando el aumento de la temperatura del material para mantener el entropía del sistema constante.

Proceso 1-3: La temperatura es constante mientras la entropía cambia.



# MCE gigante

- La principal característica de las transformaciones de primer orden es la discontinuidad en la entropía.



El cambio de entropía magnética para las transformaciones magnéticas de primer orden, durante la magnetización y des-magnetización, se calculan así:

## MAGNETIZACIÓN:

$$\Delta S_M(T)_{P,\Delta H} = \left( \frac{\Delta E_{H_2}}{T_{P,H_2}} - \frac{\Delta E_{H_1}}{T_{P,H_1}} \right) + \int_{T_1}^{T_{p,H_1}} \left( \frac{[C^l(T)_{H_2} - C^l(T)_{H_1}]_p}{T} \right) dT + \int_{T_{p,H_1}}^{T_{p,H_2}} \left( \frac{[C^l(T)_{H_2} - C^h(T)_{H_1}]_p}{T} \right) dT + \int_{T_{p,H_2}}^T \left( \frac{[C^h(T)_{H_2} - C^h(T)_{H_1}]_p}{T} \right) dT$$

## DES-MAGNETIZACIÓN:

$$\Delta S_M(T)_{P,\Delta H} = \left( \frac{\Delta E_{H_1}}{T_{P,H_1}} - \frac{\Delta E_{H_2}}{T_{P,H_2}} \right) + \int_{T_1}^{T_{p,H_1}} \left( \frac{[C^l(T)_{H_1} - C^l(T)_{H_2}]_p}{T} \right) dT + \int_{T_{p,H_1}}^{T_{p,H_2}} \left( \frac{[C^l(T)_{H_1} - C^h(T)_{H_2}]_p}{T} \right) dT + \int_{T_{p,H_2}}^T \left( \frac{[C^h(T)_{H_1} - C^h(T)_{H_2}]_p}{T} \right) dT$$



- A diferencia de las transformaciones de primer orden, en las de segundo orden la entalpia de transformación es nula y no existe diferencia en el comportamiento de la capacidad calorífica, antes y después de la transformación.
- Estas diferencias son similares a la diferencia entre el enfriamiento a temperatura constante por evaporación de liquido y el enfriamiento por la simple expansión del gas.

# “PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA EN LA REFRIGERACIÓN MAGNETO- CALÓRICA”

## PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA

Esta ley se aplica a todos los sistemas, sin importar su complejidad.

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \dots (2)$$

$\Delta U$  = cambio en la energía interna del sistema

$\Delta Q$  = calor que fluye al sistema

$\Delta W$  = trabajo realizado por el sistema

## SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA

Obteniendo la ecuación de esta ley tenemos que:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \dots (3)$$

- Sustituyendo la ecuación (1) en (2):

$$\Delta U = T\Delta S - \Delta W \dots (3)$$

Sabemos que  $\Delta W = p\Delta V$ ; teniendo en cuenta una presión constante y considerando un cambio de volumen despreciable, y teniendo como una diferencial a la intensidad magnética teniendo en cuenta su volumen ( $V$ ) y permeabilidad ( $\mu_0$ ) del material, en la función de la diferencial de  $U$ , obtenemos de la ecuación (3) la siguiente.

$$dU(S, M) = TdS - \mu V H dM \dots (4)$$

A la vez analizado los procesos de magnetización y desmagnetización y considerándolos que son reversibles; es necesario recordar la ecuación de Gibbs, sustituyendo en la ecuación (4) en dicha ecuación, considerando como función de Temperatura (T) e intensidad campo magnético (H) tenemos como resultado:

$$G(T,H) = U - TS - \mu V H dM \dots (5)$$

Los diferenciales de la entalpía y la energía libre de Gibbs se calculan empleando el diferencial de la energía interna:

$$dG(T,H) = -SdT - \mu VMdH \dots (6)$$

La energía libre de Gibbs depende de la temperatura y la intensidad del campo magnético.

$$dG(T, H) = \left( \frac{\partial G(T, H)}{\partial T} \right) dT + \left( \frac{\partial G(T, H)}{\partial H} \right) dH \dots (7)$$



Teniendo en cuenta sus derivadas parciales mixtas son iguales la ecuación (1) y a ver obtenido las ecuación de Maxwell se tiene:

$$\left(\frac{\partial G(T, H)}{\partial T}\right)_H = -S$$

$$\left(\frac{\partial G(T, H)}{\partial H}\right)_T = \mu_o VMdH$$

$$\left[\frac{\partial S(T, H)}{\partial H}\right]_T = \left[\frac{\partial(\mu_o VM)}{\partial T}\right]_H$$

El cambio de entropía isotérmico se calcula reemplazando la ley de Curie-Weiss y los resultados de las ecuaciones de Maxwell, se muestran en la ecuación 8, Diferencial total

de la entropía es:

$$dS(T, H) = \frac{C(T, H)}{T} dT + \left(\frac{\partial(\mu_o VM(T, H))}{\partial T}\right)_H dH \dots (8)$$

- Cuando el proceso no es adiabático el cambio en la entropía total es igual al cambio en la entropía magnética. Cuando el proceso es adiabático, la entropía total permanece constante.

$$S(T)_{H_I, P} = \left[ S(T \pm \Delta T_{ad} (T)_{\Delta H})_{H_F, P} \right]$$

El cambio de entropía magnética se puede calcular con las ecuaciones:

$$\Delta S_M (T)_{P, \Delta H} = \left[ S_M (T)_{H_F} - S_M (T)_{H_I} \right]_P$$

$$\Delta S_M (T)_{P, \Delta H} = \int_{T_1}^T \left( \frac{[C(T)_{H_F} - C(T)_{H_I}]_P}{T} \right) dT$$

Cambio de temperatura adiabático durante la des-magnetización y magnetización

$$\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H,P} = -T \left\{ \exp \left[ -\frac{\Delta S_M(T)_{\Delta H,P}}{C(T_0)_{H_1,P}} \right] - 1 \right\}$$

(17)

$$\Delta T_{ad}(T)_{\Delta H,P} = T \left\{ \exp \left[ -\frac{\Delta S_M(T)_{\Delta H,P}}{C(T_0)_{H_2,P}} \right] - 1 \right\}$$

# “CARACTERIZACION DEL GADOLINIO”

# OBJETIVO

## OBJETIVO GENERAL.

- Determinar el efecto magneto-calórico en piedras de Gadolinio.

## OBJETIVO ESPECIFICOS.

- Caracterizar las muestras en estudio.
- Analizar el efecto magneto-calórico de las muestras en estudio mediante análisis de las propiedades magnéticas a partir del campo que se origina.
- A partir del comportamiento efecto magneto-calórico de las muestras estudiadas, determinar si estas podrían ser aplicadas como material base para la fabricación de sistemas de refrigeración magnética.



## GADOLINIO.

- El Gadolinio es un elemento de símbolo Gadolinio y número atómico 64, el cual pertenece al grupo de Tierras Raras, específicamente a los Lantánidos.
- Es el cuarto elemento Ferromagnético, además del Hierro, Cobalto y Níquel, donde se ha buscado investigar más sus propiedades magnéticas.



# CARACTERIZACION MAGNETO CALORICA.

Posteriormente para poder caracterizar el fenómeno magneto calórica; se calculó el cambio isotérmico en la entropía magnética, esto con el fin de determinar el efecto magneto calórico a partir del análisis obtenido.



- La mayoría de los materiales ferromagnéticos, específicamente el gadolinio cambian su orden magnético a paramagnético; se puede describir mediante la ley de Curie-Weiss.

$$M = \frac{C}{T-\theta} H \dots (9)$$

- C: constante de Curie (K).
- $\theta$ : Temperatura de transformación magnética (K).
- T: Temperatura del material.
- H: Intensidad del campo magnético (A/m).

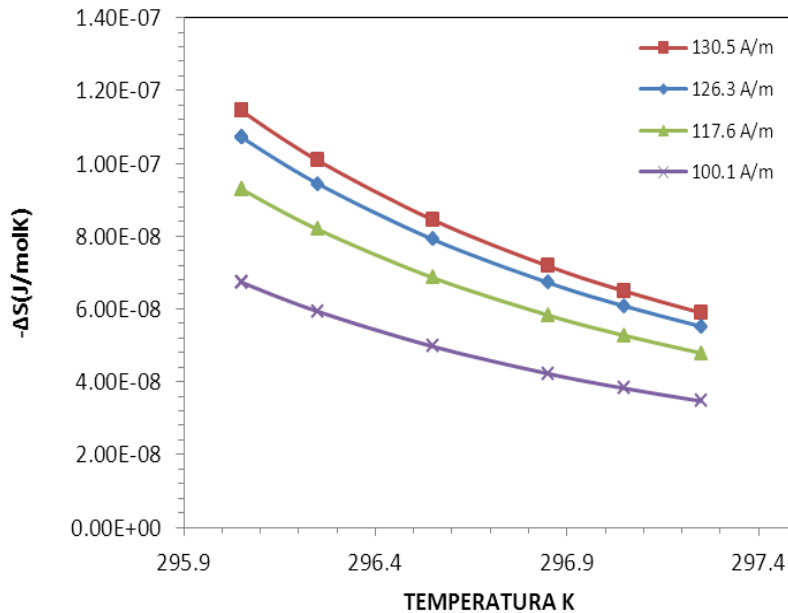
- De la ecuación 10 se obtiene sustituyendo en la ecuación 8 en 9, es decir que durante la magnetización el cambio de entropía es negativo, durante la des-magnetización es positivo y la magnitud del cambio es mayor a temperaturas cercanas a la temperatura de transformación.

$$\Delta S(T, H) = \mu_o^2 \left( \frac{C^1(H^2_{inicial} - H^2_{final})}{2(T - \theta)^2} \right) \dots (10)$$

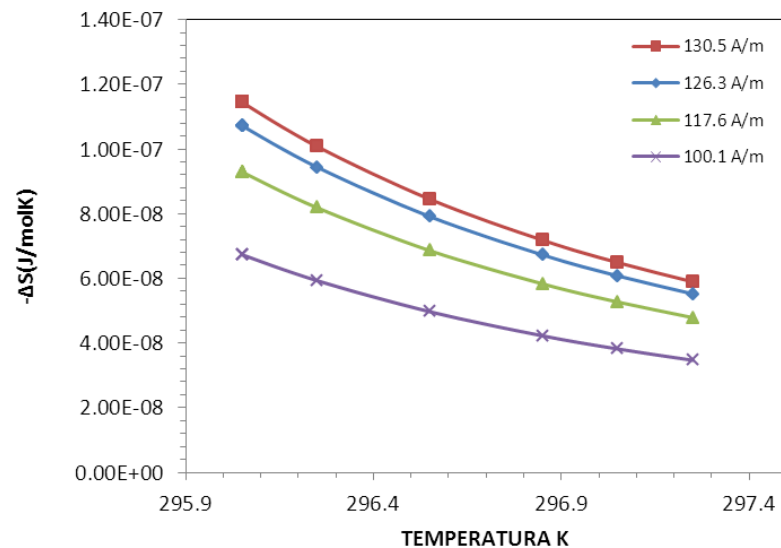
Se calcula el cambio de entropía en diferentes condiciones de temperatura e intensidad magnética tomando como base los datos de la tabla siguiente se sustituyen valores y se obtiene:

Material	$\mu_0$ (J/(A <sup>2</sup> m))	Peso molecular (g/mol)	$\theta$ (K)
Gadolinio	1,26 E-06	157,25	293

$$\Delta S(T, H) = (6.25 * 10^{-11}) \frac{JKm^2}{A^2mol} \left( \frac{(H^2_{inicial} - H^2_{final})}{2(T - 293K)^2} \right)$$



El cambio isotérmico en la entropía magnética; se calculó para para las siguientes intensidades de los campos magnéticos: 130.5 A/m, 126.3 A/m, 117.6 A/m, 100.1 A/m, 88.96 A/m.



En la cual muestra las curvas de  $\Delta SM$  (T) obtenidas mediante este proceso. Salta a la vista que existe un valor máximo en la variación de la entropía magnética en torno a la temperatura del orden magnético, es decir  $TC = 296$  K. el valor máximo de variación de la entropía magnética es de aproximadamente de  $5.892E-8$  J/mol.K para dicho campo magnético mayor de  $130.5$  A/m.



# CONCLUSION

- Los datos calculados a partir de las imanaciones realizadas de dicho experimento, son coherentes con lo que establece la termodinámica, mostrando su acenso bien diferenciado en torno asía la temperatura de Curie para dicho material.
- El pico obtenido en la variación de la entropía magnética y área bajo la curva de esta muestra de gadolinio, nos da a observar la gran importancia que se tiene en este material para su uso de un sistema de refrigeración, ya que representa la cantidad de calor que puede ser transferida entre el material y el ambiente.
- Teniendo al gadolinio como una primera opción para la fabricación de prototipos de refrigeración magneto calórica.

# Bibliografía

- Principios termodinámicos de la refrigeración magnética, 2006 [en línea]  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614909> [consultado: 9 de marzo de 2014]
- Refrigeración Magnética, 2008 [en línea]  
[http://www.catedu.es/ctamagazine/index.php?option=com\\_content&view=article&id=418&catid=55:curiosidades](http://www.catedu.es/ctamagazine/index.php?option=com_content&view=article&id=418&catid=55:curiosidades) [Consultado: 25 de marzo de 2014]
- Refrigeración Magnética a temperatura ambiente, 2008 [en línea]  
<http://www.acrlatinoamerica.com/20080910639/articulos/refrigeracion-comercial-e-industrial/refrigeracion-magnetica-a-temperatura-ambiente.html> [consultado: 25 de marzo de 2014]
- The Magnetocaloric effect and Its applications, 2003 [en línea]  
[http://books.google.com.co/books?id=eVTwxfyhxfcC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q=elektronischen%20und%20Gitter%20Entropien&f=false](http://books.google.com.co/books?id=eVTwxfyhxfcC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=elektronischen%20und%20Gitter%20Entropien&f=false) [consultado 23 de marzo de 2014]



**ECORFAN®**

**© ECORFAN-Mexico, S.C.**

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMIMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- ([www.ecorfan.org/](http://www.ecorfan.org/) booklets)