

# CICLO DE HISTÉRESIS



**UNIVERSIDAD DE MURCIA**  
Licenciatura en Física

José Manuel Alarcón Soriano  
jmas@alu.um.es  
Miguel Albaladejo Serrano  
mas4@alu.um.es

Presentado el día 7 de Junio 2004

## Resumen

Se presenta un estudio teórico-experimental del fenómeno de la *histéresis*, y la caracterización de tal fenómeno en algunos materiales, como hierros laminados. Además, se aprovechan algunos procedimientos experimentales para obtener parámetros característicos. También se estudia el efecto de la existencia de un pequeño *gap* o hueco de aire en el núcleo de hierro.

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Preámbulo teórico</b>	<b>2</b>
2.1. Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo . . . . .	2
2.2. Ciclo de Histéresis . . . . .	4
<b>3. Sistema experimental y procedimiento de medida</b>	<b>6</b>
3.1. Medida del ciclo de histéresis punto a punto . . . . .	6
3.2. Medida del ciclo de histéresis mediante circuito integrador . . .	8
<b>4. Resultados experimentales</b>	<b>11</b>
4.1. Caracterización de los núcleos de hierro laminado . . . . .	11
4.2. Efecto del gap. Pérdida de flujo magnético . . . . .	22
<b>5. Conclusiones</b>	<b>23</b>

# 1. Introducción

La palabra *histéresis* viene del griego, *ὑστέρησις*, que significa *retraso*, *quedar atrás*. En general, se usa el término para designar procesos en los que la evolución del sistema depende de la preparación anterior, y de una reacción algo así como tardía a la acción.

En este trabajo se pretende hacer una introducción teórica y experimental al fenómeno de la histéresis, que tiene las siguientes propiedades:

- Se produce en materiales **ferromagnéticos** (sección 2.1, página 2).
- Fenómeno **magnético** producido por la no linealidad entre el campo magnético **B** y la excitación magnética **H** (sección 2.2, página 4).
- **Permeabilidad magnética** altamente variable.

Tratamos de caracterizar varios núcleos de hierro laminado, mediante su ciclo de histéresis, y medimos el efecto que produce la presencia de un gap de aire en el entrehierro del núcleo.

Al final del documento se incluyen las referencias bibliográficas consultadas, así como un índice de tablas y figuras para un más cómodo manejo del artículo.

## 2. Preámbulo teórico

### 2.1. Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo

Por definición, la intensidad magnética **H** se define mediante la relación:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M}, \quad (1a)$$

Esto implica:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (1b)$$

Cuando se plantean problemas relacionados con la teoría magnética, es fundamental disponer de una relación entre la magnetización  $\mathbf{M}$  y la intensidad magnética  $\mathbf{H}$ . En muchos materiales, que podríamos llamar *lineales*, se da una relación de tipo tensorial, a través del tensor diagonal *susceptibilidad magnética*:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \chi_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \chi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \chi_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

Si además el material es *isótropo*, tendremos un tensor diagonal proporcional a la matriz identidad, es decir,  $\chi_{xx} = \chi_{yy} = \chi_{zz} = \chi_M$ , y  $\chi_M$  es simplemente la *susceptibilidad magnética*:

$$\mathbf{M} = \chi_M \mathbf{H} \quad (3)$$

Los materiales en los que  $\chi_M < 0$  son *diamagnéticos*, y el material “perjudica” la inducción magnética, mientras que si  $\chi_M > 0$ , el material es *paramagnético*, y favorece la inducción magnética.

Es evidente a partir de las ecuaciones (1) que una relación lineal entre  $\mathbf{H}$  y  $\mathbf{M}$  tiene como consecuencia que también  $\mathbf{B}$  y  $\mathbf{H}$  sean lineales:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + \chi_M) \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} \quad (4)$$

El parámetro  $\mu$  se conoce como *permeabilidad*, y su razón respecto a la permeabilidad del vacío como *permeabilidad relativa*,  $K_m = \mu/\mu_0$ .

Pero los fenómenos magnéticos no son siempre lineales, y aparecen unos materiales, llamados *ferromagnéticos*, caracterizados porque:

- Pueden presentar una magnetización permanente.
- Su presencia influye considerablemente sobre  $\mathbf{H}$ .
- No son lineales, es decir, ecuaciones como las (3) y (4) pierden su sentido con  $\chi_M$  y  $\mu$  como parámetros.

Sin embargo, se sigue definiendo la permeabilidad mediante (4), pero tomando a  $\mu$  no como un parámetro, sino a través de una relación  $\mu = \mu(\mathbf{H})$ :

$$\mathbf{B} = \mu(\mathbf{H})\mathbf{H} \quad (5)$$

Así, la permeabilidad mide la mayor o menor respuesta del material a la excitación magnética.

Materiales ferromagnéticos son, por ejemplo, el Hierro (Fe), el Níquel (Ni), Cobalto (Co) y algunas aleaciones. Sus aplicaciones tecnológicas son muy importantes, para almacenamiento de energía, motores eléctricos, almacenamiento de información (cintas magnéticas), etc. . .

## 2.2. Ciclo de Histéresis

Partimos de una muestra no imanada (desmagnetizada). Si aumentamos progresivamente la intensidad magnética, partiendo de cero, y vamos midiendo  $\mathbf{H}$ , obtendremos una curva, la *curva de primera imanación*, que será como la que se presenta en la figura 1. Dicha curva fue obtenida por nosotros experimentalmente, y aquí se presenta como un ejemplo. En este tramo, la permeabilidad  $\mu = B/H$  es claramente positiva ( $B$  y  $H$  lo son), pero puede tomar valores muy grandes, hasta varios ordenes de magnitud mayores que la del vacío,  $\mu_0$ . Pero dicha permeabilidad alcanzará un máximo, debido a que el material tiende hacia un valor máximo de la magnetización, la *magnetización de saturación*,  $M_s$ , lo que hace que el campo magnético  $B$ , según la ecuación (1b), aumente casi exclusivamente por el término  $\mu_0 H$ .

Si ahora empezamos a descender la excitación magnética  $\mathbf{H}$ , el campo magnético  $\mathbf{B}$  no varía con  $\mathbf{H}$  bajando por la misma curva, sino que describe la curva dada en la figura 2. Si seguimos bajando hasta la misma excitación magnética pero de signo contrario, la figura mostrará una amplia simetría, que se confirmará si volvemos a subir  $\mathbf{H}$  hasta el mismo punto anterior. Si volviésemos a repetir la experiencia, pasando por los mismos puntos extremos, comprobaríamos, salvo errores experimentales, que el ciclo se repite. Este ciclo es lo que se conoce como *ciclo de histéresis*.

En definitiva, el fenómeno de la histéresis se debe a que  $B$  no es una función unievaluada de  $H$ . De hecho, la relación entre  $B$  y  $H$  depende de la

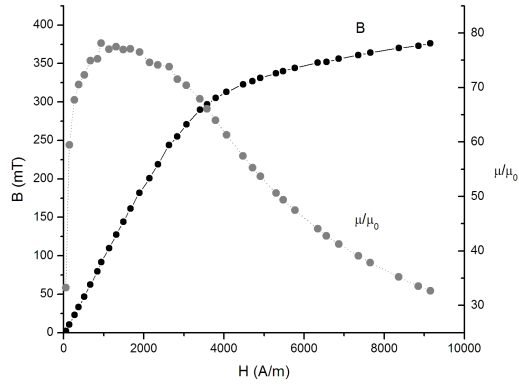


Figura 1: Muestra de una curva de primera imanación y de la permeabilidad relativa.

historia de preparación del material.

En la figura se muestra esquemáticamente una curva o lazo de histéresis, así como la imagen obtenida mediante osciloscopio con un circuito integrador (que se explicará más adelante) del mismo.

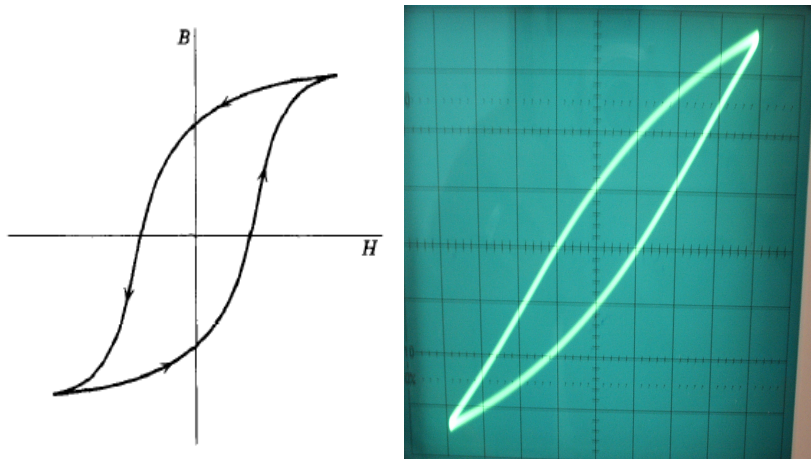


Figura 2: Ejemplo de curva de histéresis

### 3. Sistema experimental y procedimiento de medida

#### 3.1. Medida del ciclo de histéresis punto a punto

Si necesitamos medir punto a punto la respuesta del material frente a una excitación magnética  $H$ , debemos ser capaces de medir  $B$  y  $H$ .  $B$  lo medimos introduciendo una sonda Hall en un “pequeño” gap que le dejamos al toroide. Este gap provocará “pequeñas” pérdidas debido a que hay flujo de campo magnético que se escapa a través de él y dichas pérdidas serán evaluadas más adelante. El circuito utilizado será el que se muestra en la figura 3. En la figura 4 podemos observar una imagen del circuito real montado.

Este sencillo montaje nos permite aplicar un  $H$  conocido y a la vez medir  $B$  con el teslámetro. Este  $H$  no lo medimos directamente, sino que lo deducimos a partir de la diferencia de potencial que nosotros medimos con el multímetro conectado en los extremos de la resistencia.

La relación lineal con  $V$  viene dada por la siguiente fórmula:

$$V_r = \frac{L_t r}{N} H \quad (6)$$

En la anterior relación, tenemos:

- $V_r$ : Diferencia de potencial entre los extremos de la resistencia.
- $L_t$ : Longitud media del toroide.
- $r$ : Resistencia.
- $N$ : Número de espiras totales que envuelven al toroide.
- $H$ : Excitación magnética.

Esta ecuación es fácilmente deducible. Por la ley de Ampère podemos relacionar la intensidad que transcurre por un solenoide con la excitación

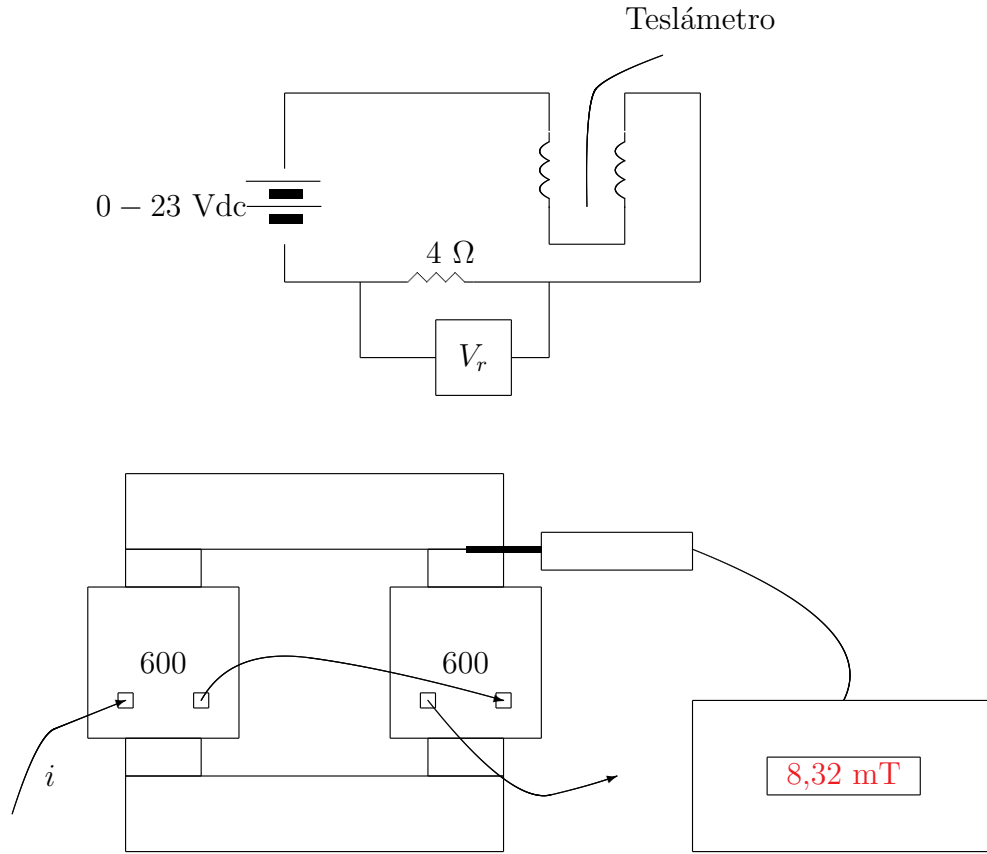


Figura 3: Esquema del diseño experimental utilizado para medir el ciclo de histéresis punto a punto con un circuito y un teslámetro.

magnética que produce de la siguiente forma:

$$H = nI \quad (7)$$

donde  $n$  es la densidad de espiras que envuelven al toroide. Esa densidad se entiende como  $\frac{N}{L_t}$ . Además podemos relacionar  $I_r$  con  $V_r$  si conocemos el valor de la resistencia  $r$  gracias a la ley de Ohm. Así que por otro lado,  $V_r = rI_r$ . Pero como toda la intensidad que circula por el circuito atraviesa también la resistencia, entonces  $I_r = I$ , y por lo tanto:

$$H = \left( \frac{N}{L_t} \right) \left( \frac{V_r}{r} \right) \quad (8)$$



Figura 4: Imagen real del circuito utilizado para medir el ciclo de histéresis punto a punto con un circuito y un teslámetro.

que es justamente la relación (6) con  $H$  despejado.

### 3.2. Medida del ciclo de histéresis mediante circuito integrador

Sin embargo, hay otra forma de obtener el ciclo de histéresis, sin tener que introducir una sonda Hall (con lo que no habría problemas por parte del gap) y es con un osciloscopio y un circuito integrador.

La idea es utilizar una fuente de tensión variable con el anterior circuito solo que esta vez la segunda bobina conectada al toroide va a un circuito integrador con el que se puede relacionar la tensión medida en los extremos de condensador con el campo magnético que fluye por el toroide. El circuito usado está representado esquemáticamente en la figura 5.

La relación es la siguiente:

$$V_c = \frac{N_s A}{RC} B \quad (9)$$

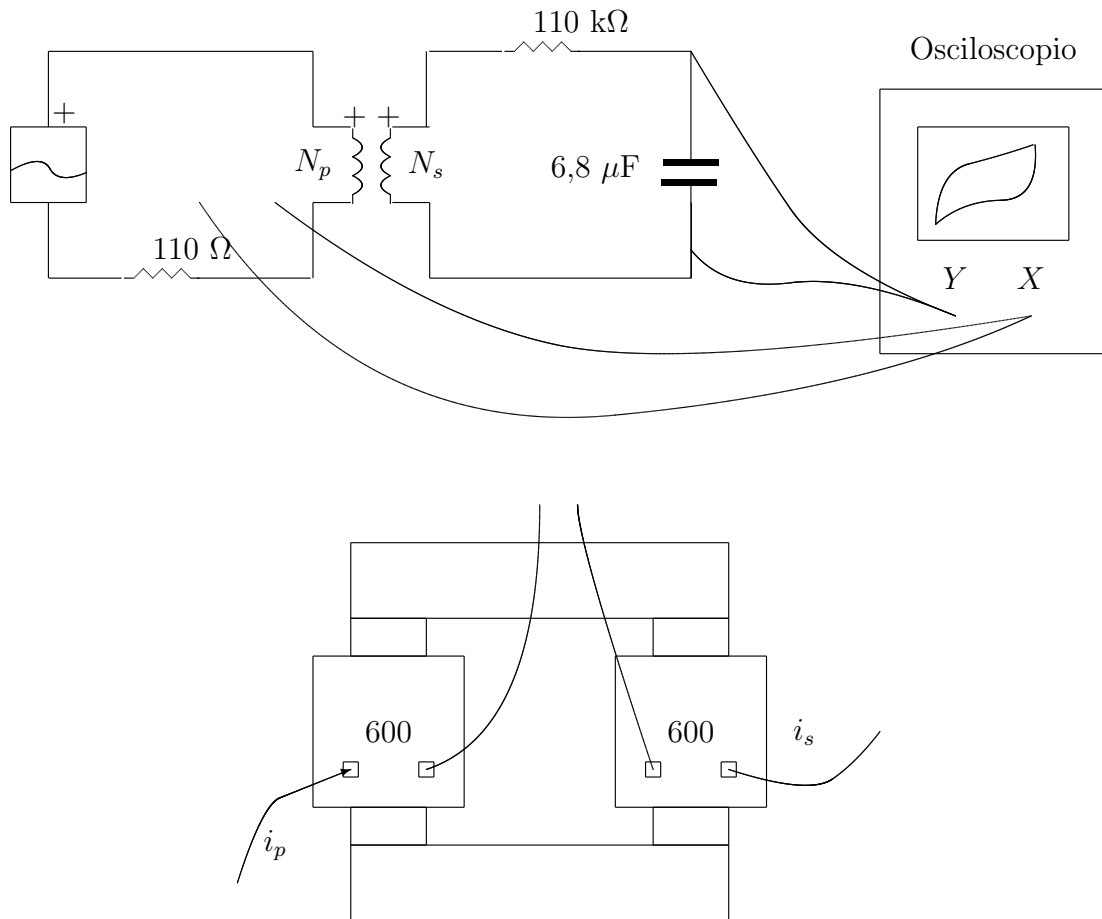


Figura 5: Esquema del diseño experimental utilizado para medir el ciclo de histéresis mediante un circuito integrador y un osciloscopio.

Los elementos indicados son:

- $V_c$ : Diferencia de potencial entre los extremos del condensador.
- $N_s$ : Número de espiras del circuito secundario.
- $A$ : Área transversal del toroide.
- $R$ : Resistencia del circuito secundario.
- $C$ : Capacidad del condensador.

Para demostrarla, partimos de lo siguiente:

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt \quad (10)$$

Donde  $V_c(t)$  es la caída de potencial que se produce en los extremos del condensador en el instante  $t$ , e  $i_c(t)$  es la intensidad que llega a las placas del condensador en ese mismo instante.

$$i(t) = \frac{V(t)}{R} \quad (11)$$

Donde ésta vez,  $i(t)$  es la intensidad que circula por todo el circuito (ya que el circuito está en serie),  $V(t)$  es la caída de potencial que se produce entre los extremos de la bobina y  $R$  es la resistencia del circuito. La resistencia de éste circuito de corriente alterna viene únicamente determinada por la resistencia de  $110 \text{ k}\Omega$ . Además por la ley de Faraday-Lenz podemos relacionar ésta  $V(t)$ , con el flujo de campo magnético que circula por el núcleo ( $\phi$ ), de la siguiente forma:

$$V(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (12)$$

Que para  $N$  espiras quedaría:

$$V(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (13)$$

Y como  $\phi(t) = B(t)A$  la ecuación queda de la forma:

$$V(t) = NA \frac{dB(t)}{dt} \quad (14)$$

Así pues, teniendo en cuenta que  $i(t) = i_c(t)$  y la última ecuación, podemos deducir de (10) que:

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt = \frac{N_s A}{RC} \int_0^t \frac{dB(t)}{dt} dt = \frac{N_s AB(t)}{RC} \quad (15)$$

Con lo que la relación queda demostrada.

Es importante ver que una de las señales, la que corresponde a  $B$ , tiene un comportamiento sinusoidal, mientras que la otra (la que corresponde a  $H$ ) no, lo que hace que en su composición no obtengamos una típica curva de Lissajous.

Así que simplemente con conocer unos pocos datos fáciles de determinar, podemos conocer el campo magnético que se ha inducido con el circuito primario, todo ello sin tener que introducir el molesto gap.

## 4. Resultados experimentales

### 4.1. Caracterización de los núcleos de hierro laminado

Para poner en práctica estas ideas elegimos caracterizar dos núcleos. Ambos eran laminados y sus dimensiones eran muy parecidas, así que llamaremos hierro plateado al hierro que en las fotos aparece plateado y azul al que aparece pintado de azul, que es el que dieron los del PHYWE junto con la práctica de Histéresis.

Los resultados obtenidos en la obtención de las curvas de primera imanación se muestran en la tabla 1. Por otro lado, las tablas de datos de las curvas de histéresis para los hierros se encuentran en las tablas 2 y 3.

Como podemos ver en la gráfica correspondiente a la primera imanación del núcleo plateado (figura 7) tenemos que, en una primera fase, el material ferromagnético responde alineando sus unidades imanables rápidamente con el campo imanante  $H$ . Esta respuesta es en principio muy rápida, y precisa de poco trabajo por parte de la fuente (que es la que induce el campo imanante). Concretamente hasta un valor de  $H = 2000$  A/m, el cociente  $\mu/\mu_0$  va creciendo hasta que alcanza su valor máximo alrededor de dicho punto. Este cociente es una forma sencilla y visual, si se superponen las gráficas de  $B$  y  $\mu/\mu_0$ , de analizar la respuesta al campo imanante del material frente al comportamiento que tendría si fuera lineal. En ésta gráfica se puede visualizar la tendencia hacia la saturación a partir de la cual el material si que

Núcleo de hierro plateado			Núcleo de hierro azul		
$H$ (A/m)	$B$ (mT)	$\mu/\mu_0$	$H$ (A/m)	$B$ (mT)	$\mu/\mu_0$
0	2,42	--	0	-2	--
19,15403	8,64	--	9,36768	-1,3	--
105,34717	29,1	--	56,20609	2,35	33,28855
229,84836	63,3	219,26669	140,51522	10,5	59,49443
335,19553	93,8	222,79989	271,66276	23,1	67,70055
584,19793	168,8	230,05029	374,70726	33,2	70,54339
718,27614	207	229,45064	515,22248	46,8	72,3205
957,70152	274	227,78795	665,10539	62,6	74,93664
1340,78212	380	225,65021	843,09133	79,7	75,26517
1474,86034	426	229,96888	936,76815	91,9	78,10768
1771,74781	501	225,13664	1133,48946	109,7	77,05477
2202,71349	606	219,04078	1311,47541	127,6	77,46417
2624,10216	713	216,3312	1489,46136	144	76,97392
2978,45172	774	206,90013	1667,44731	161,5	77,11356
3610,53472	871	192,06887	1892,27166	181,8	76,49283
3926,57622	910	184,51757	2145,19906	201	74,6
4405,42698	945	170,78675	2351,28806	219	74,1564
4874,70072	977	159,5721	2632,3185	244	73,80092
5219,47326	997	152,08236	2838,40749	255	71,52795
5506,78372	1013	146,4609	3063,23185	271	70,43683
5985,63448	1035	137,67038	3400,46838	290	67,89998
6253,7909	1047	133,29495	3578,45433	297	66,0802
6646,44852	1063	127,33681	3793,91101	305	64,00635
7201,9154	1084	119,83719	4065,57377	313	61,2961
7460,49481	1092	116,53741	4477,75176	323	57,43186
7891,4605	1106	111,58559	4711,94379	327	55,25327
8332,00319	1119	106,9279	4908,66511	331	53,68772
8695,92977	1130	103,46007	5302,10773	337	50,6048
9251,39665	1156	99,48575	5480,09368	340	49,39708
9500,39904	1153	96,62685	5770,4918	344	47,46309
9960,09577	1163	92,96652	6341,92037	351	44,0653
10075,01995	1167	92,22216	6557,37705	352	42,73885
10611,3328	1178	88,38645	6866,51054	356	41,27853
10946,52833	1185	86,18909	7353,62998	361	39,08551
			7653,39578	364	37,86671
			8365,33958	370	35,21507
			128852,45902	373	33,54712
			9152,22482	376	32,70932

Cuadro 1: Datos de las curvas de primera imanación para los núcleos de hierro laminado.

$\mu_0 H$ (mT)	$B$ (mT)	$\mu_0 H$ (mT)	$B$ (mT)
8,90126	1079	-11,00629	-1128
10,45297	1119	-12,76248	-1165
11,66787	1147	-14,12173	-1189
13,0632	1177	-13,11132	-1168
14,07362	1195	-11,6799	-1138
13,17146	1173	-10,465	-1110
11,96859	1148	-9,29821	-1082
10,50108	1115	-7,75853	-1036
9,32227	1085	-6,39928	-985
7,97505	1048	-5,3167	-925
6,42334	990	-3,52442	-726
5,38887	934	-2,64632	-581
3,89731	796	-1,33519	-311
2,59821	575	-0,24057	-0,65
1,34722	317	0	-0,12
0,31275	85	0,2526	47
0	13,3	1,05853	227
-0,26463	-48	2,16517	476
-1,2149	-265	3,33196	684
-2,55009	-552	4,63106	865
-3,54848	-733	6,01437	962
-4,91975	-893	7,38564	1024
-6,1948	-974	8,78097	1071
-7,55404	-1033	9,98385	1106
-8,9614	-1077	11,24686	1136
-9,86356	-1102	12,75045	1168

Cuadro 2: Datos para la curva de histéresis del hierro plateado

$\mu_0 H$ (mT)	$B$ (mT)	$\mu_0 H$ (mT)	$B$ (mT)	$\mu_0 H$ (mT)	$B$ (mT)	$\mu_0 H$ (mT)	$B$ (mT)
11,49519	376	-1,24718	-95,7	-9,29499	-361	0,37651	23,7
11,11869	373	-1,44719	-112,7	-8,87142	-357	0,61182	42,9
10,37744	369	-1,7884	-137,7	-8,40079	-354	0,81184	58,8
10,09506	367	-2,07078	-157,9	-7,76543	-348	1,00009	74
9,6362	364	-2,62378	-197,3	-7,49482	-345	1,38837	104
9,1185	360	-2,82379	-209	-7,21244	-343	1,76487	132,5
8,35372	354	-3,01205	-222	-6,67121	-337	2,20021	163,2
7,97722	350	-3,44738	-249	-6,05939	-330	2,2355	164,1
7,2948	344	-3,62387	-260	-5,82407	-326	2,57671	188
6,90653	340	-4,02391	-280	-5,09459	-314	2,98852	214
6,62415	337	-4,52984	-299	-4,94164	-310	3,28266	232
5,83584	327	-4,89458	-309	-4,31805	-295	3,6121	250
5,23578	318	-5,30638	-319	-4,01214	-276	3,80036	260
4,92987	312	-6,00056	-330	-3,52974	-251	4,37688	287
4,25922	294	-6,28294	-333	-3,35326	-242	4,80045	302
3,52974	262	-7,16538	-344	-3,04734	-221	5,20049	311
3,08264	233	-7,37716	-346	-2,77673	-205	5,49463	317
2,7179	210	-7,73014	-350	-2,51788	-189,4	5,52993	317
2,2708	182	-8,08311	-353	-2,20021	-170,4	5,85937	323
1,859	150	-8,51844	-356	-1,88253	-147,5	6,20058	327
1,45896	121	-8,84789	-359	-1,67074	-132,4	6,73004	335
1,09422	94	-9,34205	-363	-1,43543	-118,5	7,11831	339
0,82361	70	-9,71856	-365	-1,11775	-96,1	7,44776	343
0,61182	55,9	-10,048	-367	-0,8942	-78,8	7,7066	346
0,27061	30,2	-10,47157	-370	-0,76478	-68,1	8,20077	350
0,08236	15,2	-10,88337	-373	-0,47063	-44,8	8,68317	355
0	8,1	-11,24811	-375	-0,22355	-26	8,97731	357
-0,01177	6,4	-11,53049	-377	-0,14119	-19,97	9,05967	357
-0,18825	-8,7	-11,02456	-373	-0,01177	-9,55	9,58913	362
-0,49416	-34,7	-10,70689	-371	0	-8,28	10,00094	365
-0,68242	-49,5	-10,11859	-367	0,05883	-3,2	10,4951	368
-0,91773	-69,7	-9,69503	-364	0,20002	8,83	11,49519	374

Cuadro 3: Datos para la curva de histéresis del hierro azul

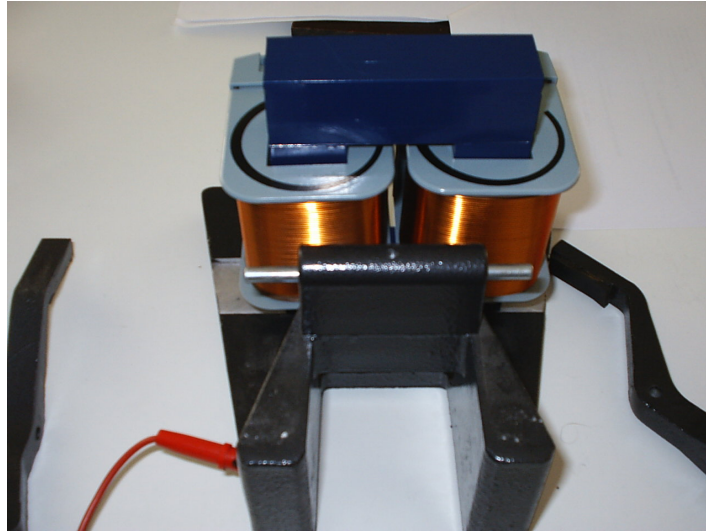


Figura 6: Núcleo de hierro laminado pintado de azul, montado sobre las bobinas de cobre utilizadas en el circuito.

responde de forma lineal a un campo imanante  $H$ . De hecho, si hubiéramos podido aplicar un campo imanante  $H$  lo suficientemente grande, habríamos visto como los valores de  $\mu/\mu_0$  tendían cada vez de forma más suave hacia la unidad, que es el valor correspondiente a la saturación. Como se puede observar en esta gráfica, el valor obtenido de  $\mu/\mu_0$  para el máximo valor aplicado de  $H$  es de 80, que queda muy lejos de la unidad. Esto indica que este hierro plateado necesita de un campo imanante muy intenso para alcanzar la saturación y por lo tanto necesita mucho trabajo por parte de la fuente para que se alcance la saturación, ya que la energía magnética por unidad de volumen viene dada, de forma general, por:

$$u_m = \int_0^B H dB \quad (16)$$

Con lo que éste valor de  $u_m$  será mayor cuanto mayor sea el el cociente  $\mu/\mu_0$ .

El núcleo azul, como se puede observar en comparación con el núcleo plateado (gráfica 8), no responde tan rápidamente al campo imanante. Esto quiere decir que su permeabilidad para cada  $H$  es menor que la del núcleo plateado. Además, el hecho de que para el mismo valor máximo de  $H$ , el núcleo azul esté mucho mas próximo a la saturación que el plateado indica

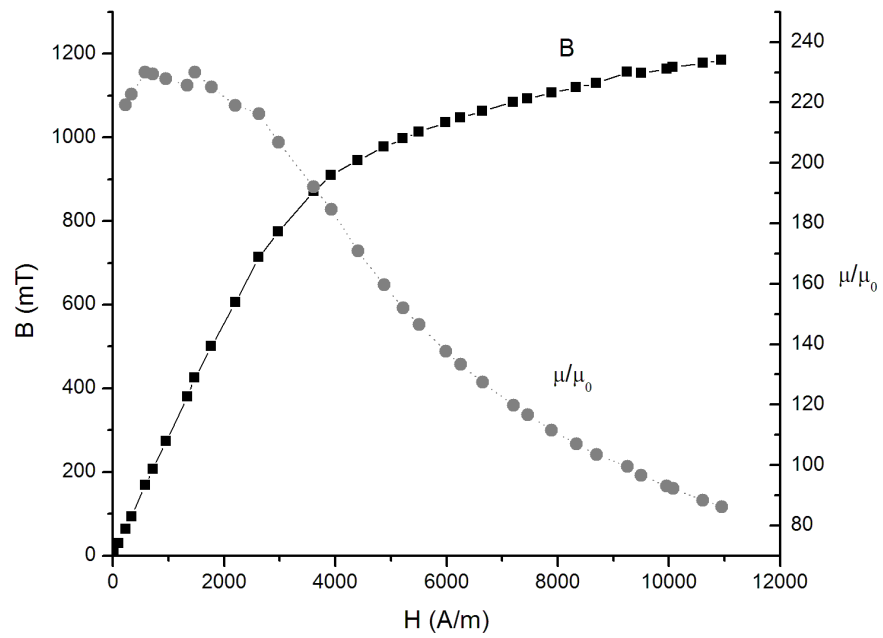


Figura 7: Curva de primera imanación para el hierro plateado

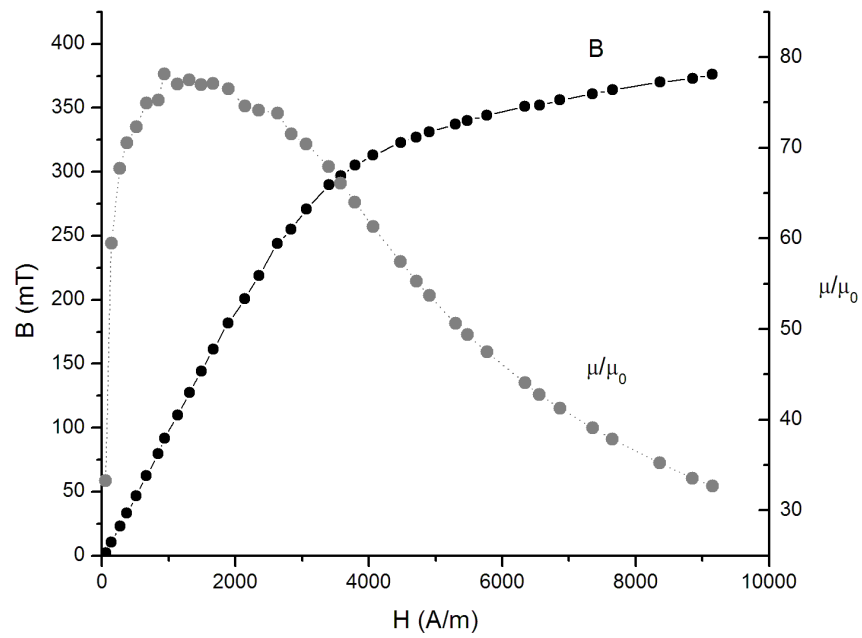


Figura 8: Curva de primera imanación para el hierro azul

que el primero está compuesto de menos unidades imanables que el segundo, de lo que se derivan importantes diferencias prácticas que se verán en las conclusiones.

Observando atentamente la curva de histéresis del hierro plateado 9, podemos ver que el material apenas presenta histéresis. Esto parece indicar que el material se compone de unidades fácilmente imanables, es decir, que responden consecuentemente con el campo imanante. Para el núcleo azul también tenemos su gráfica del ciclo de histéresis, en la figura 10.

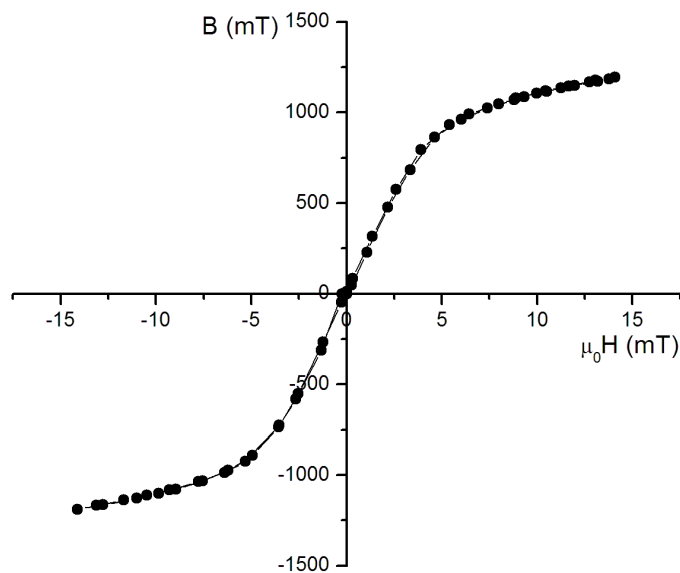


Figura 9: Ciclo de histéresis para el hierro plateado.

Aunque puede que no lo parezca presenta más histéresis el núcleo azul que el plateado ya que, por ejemplo la remanencia  $B_r$  comparada con el máximo valor del campo magnético,  $B_{max}$ , es, para el núcleo azul:

$$\frac{B_r}{B_{max}} = 0,02 \quad , \quad (17)$$

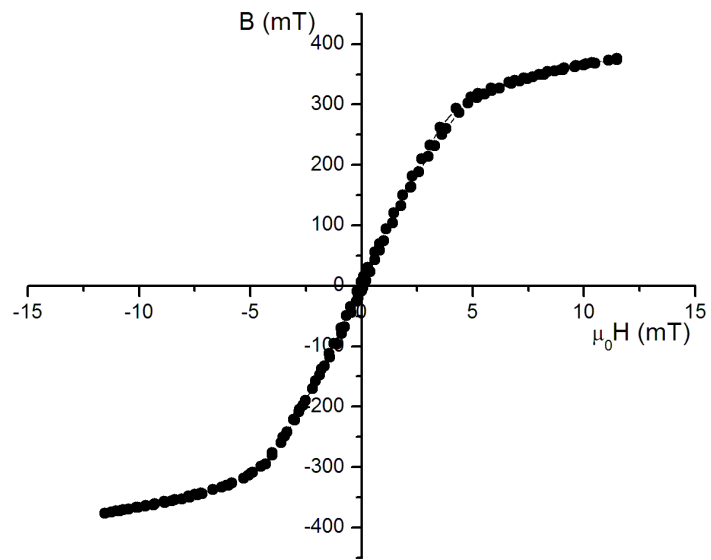


Figura 10: Ciclo de histéresis para el hierro azul.

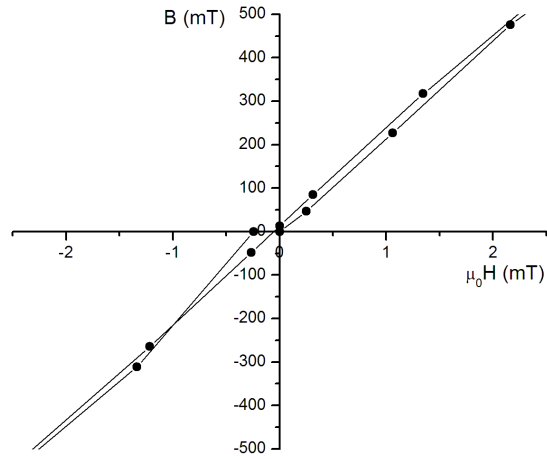


Figura 11: Ampliación del centro del ciclo de histéresis para el hierro plateado.

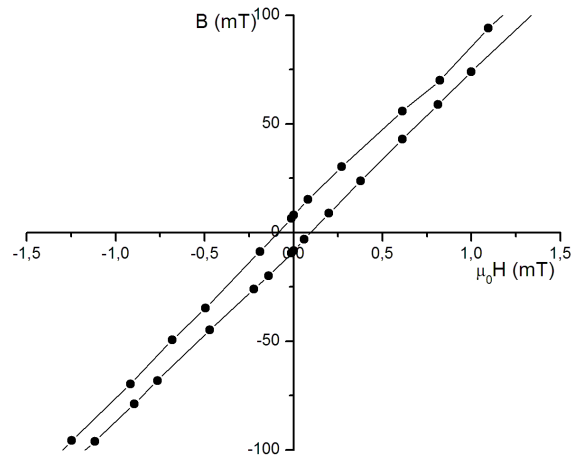


Figura 12: Ampliación del centro del ciclo de histéresis para el hierro azul.

mientras que para el núcleo plateado:

$$\frac{B_r}{B_{max}} = 0,01 \quad (18)$$

Para el núcleo azul, el 2% de  $B_{max}$  se mantiene, mientras que para el plateado, solo se mantiene el 1%.

Con lo que parece indicar que, no solo el núcleo plateado posee más unidades imanables que el azul, sino que, además, su respuesta va más en consonancia con el campo imanante, es decir, posee menos histéresis.

Se podría pensar que, al haber llegado a la saturación, el campo magnético  $B$  en el material comienza a aumentar linealmente con  $H$ , ya que  $M$  comienza a hacerse pequeño en comparación con  $H$ . Y es cierto. La pendiente que definiría la recta sería entonces  $\mu_0$ , y un método para comprobarlo sería hacer un ajuste lineal de los últimos puntos de la curva de primera imanación, o de los del final del cuadrante del ciclo de histéresis. Pero existe un problema, y es que aunque se alcanza la saturación, no podemos aumentar lo suficiente el voltaje para que  $H$  alcance valores tales que  $M$  sea realmente despreciable; los ajustes, evidentemente, conducen a valores de una pendiente del orden de magnitud de  $\mu_0$ , pero eso es lo máximo que podemos conseguir.

Podemos comentar un último punto, antes de pasar al análisis del efecto del gap. Podemos observar, en las gráficas 11 y 12, el ciclo de histéresis ampliado para el centro de las medidas, es decir, cerca del origen tanto en el eje de  $H$  como en el eje de  $B$ . En una de ellas, la que se refiere al núcleo plateado (figura 11), las curvas ascendentes y descendentes del ciclo de histéresis se cortan. Esto se debe seguramente a un problema técnico, que no es más que un descenso precipitado de la tensión en el circuito, y, por tanto, del valor de  $H$ . Para confirmarnos en la teoría que habíamos supuesto, precavidos por el hecho anterior, trabajamos con el núcleo azul con más prudencia en las proximidades del origen, descendiendo más despacio el valor de la tensión, obteniendo los resultados correctos en las curvas, como se aprecia en la figura 12.

## 4.2. Efecto del gap. Pérdida de flujo magnético

Decíamos que el segundo montaje nos permitía estudiar la respuesta del núcleo sin tener que introducir el problemático gap. Ahora veremos como es de problemático.

El gap es una pequeñísima abertura (en nuestro caso de 2 mm) que se debe practicar al núcleo para poder introducir una sonda y medir el campo magnético en el entrehierro. Esta abertura origina un problema y es que se produce una pérdida de flujo de campo magnético. Ésto repercute en que el campo que está midiendo la sonda (o el osciloscopio mediante el circuito secundario) disminuya sistemáticamente. Esta pérdida se puede medir y visualizar en el osciloscopio ya que las diferencias de medir con gap o sin gap son notables como se puede ver en las imágenes 14. El efecto global es que, cuando quitamos el gap, hay un “levantamiento” de la curva de histéresis, ya que el flujo magnético que se pierde es menor cuando no hay gap que cuando sí lo hay.

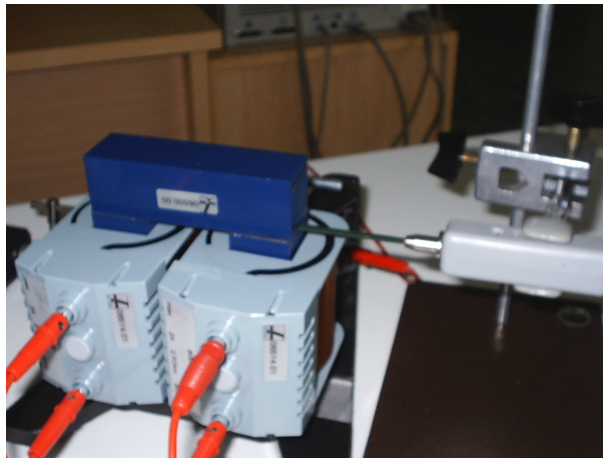


Figura 13: Imagen del circuito montado con la sonda, que es lo que genera el gap

Para ambos núcleos, midiendo los máximos valores de  $B$  que se alcanzaban en el caso de utilizar o no el gap, hemos podido comprobar que con el gap se producía una pérdida de alrededor del 50% del flujo de campo magnético con respecto al que habría si no hubiera gap.

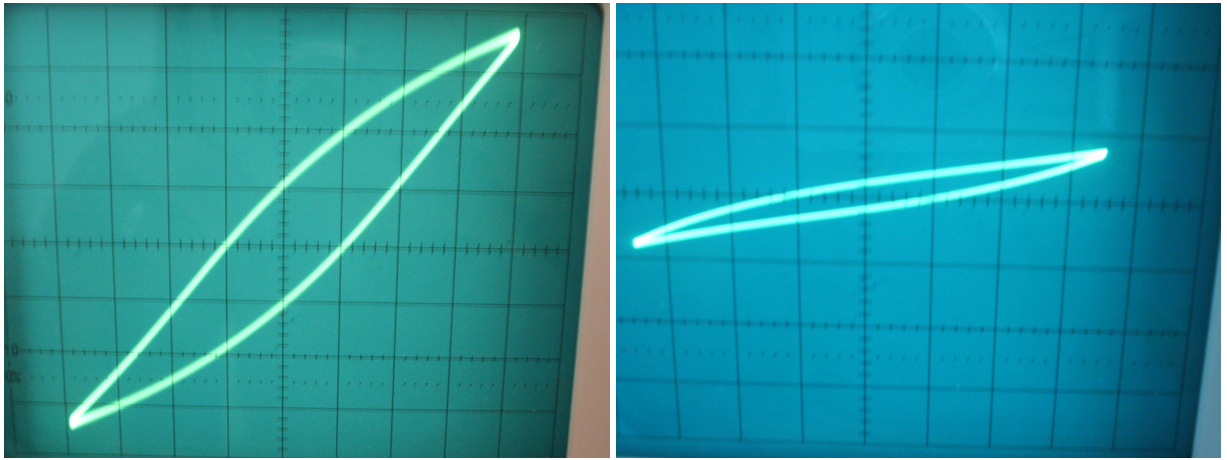


Figura 14: Imagen del hierro plateado sin gap a la izquierda y con gap (de 2 mm) a la derecha

Es decir, que los efectos del gap no son en nada despreciables, aunque son tanto más despreciables como pequeño sea el gap.

## 5. Conclusiones

Como hemos comentado en la introducción, los materiales magnéticos tienen diferentes aplicaciones prácticas, y en base a esta utilidad elaboraremos nuestras conclusiones.

Decíamos que los materiales ferromagnéticos se usan para aumentar el flujo magnético de un circuito de corriente y como imanes permanentes y según nuestros resultados, para ambas aplicaciones es mejor el plateado. El núcleo plateado es mucho mejor para aumentar el flujo magnético de un circuito de corriente y se debe a que la permeabilidad del núcleo plateado es mucho mayor, para un mismo  $H$ , que la del núcleo azul.

También, a la hora de construir un imán permanente, sería mejor utilizar el núcleo plateado ya que su remanencia es mayor, para unos valores máximos de  $H$  fijados, que la del núcleo azul.

Así que, por ejemplo, si tuvieramos que construir un electroimán con uno de los dos núcleos y necesitamos que sea capaz de crear un campo magnético  $B$  en un entrehierro, sería mucho más rentable energéticamente utilizar el núcleo plateado.

Estás son las aplicaciones más comunes, y sirven como ejemplo de utilidad del estudio, pero no son las únicas. Pero lo importante del estudio es que conociendo su histéresis, puedes deducir que material, en su interés como ferromagnético, va a servirnos mejor para realizar una tarea dada.

## Referencias

- [1] REITZ, J.R. et al., *Fundamentos de la Teoría Electromagnética*, Addison-Wesley, 4<sup>a</sup> ed., 1996
- [2] KRAUS, J.D., *Electromagnetismo*, McGraw-Hill, 1986
- [3] ZAHN, M., *Electromagnetic Field Theory*, Wiley, 1979.
- [4] JACKSON, J.D., *Classical Electrodynamics*, Wiley, 1962
- [5] NEFF, H.P., *Introductory Electromagnetics*, Wiley, 1991

## Índice de figuras

1. Muestra de una curva de primera imanación y de la permeabilidad relativa. . . . .	5
2. Ejemplo de curva de histéresis . . . . .	5
3. Esquema del diseño experimental utilizado para medir el ciclo de histéresis punto a punto con un circuito y un teslámetro. . . . .	7
4. Imagen real del circuito utilizado para medir el ciclo de histéresis punto a punto con un circuito y un teslámetro. . . . .	8

5.	Esquema del diseño experimental utilizado para medir el ciclo de histéresis mediante un circuito integrador y un osciloscopio.	9
6.	Núcleo de hierro laminado pintado de azul, montado sobre las bobinas de cobre utilizadas en el circuito. . . . .	15
7.	Curva de primera imanación para el hierro plateado . . . . .	16
8.	Curva de primera imanación para el hierro azul . . . . .	17
9.	Ciclo de histéresis para el hierro plateado. . . . .	18
10.	Ciclo de histéresis para el hierro azul. . . . .	19
11.	Ampliación del centro del ciclo de histéresis para el hierro plateado. . . . .	20
12.	Ampliación del centro del ciclo de histéresis para el hierro azul.	20
13.	Imagen del circuito montado con la sonda, que es lo que genera el gap . . . . .	22
14.	Imagen del hierro plateado sin gap a la izquierda y con gap (de 2 mm) a la derecha . . . . .	23

## Índice de cuadros

1.	Datos de las curvas de primera imanación para los núcleos de hierro laminado. . . . .	12
2.	Datos para la curva de histéresis del hierro plateado . . . . .	13
3.	Datos para la curva de histéresis del hierro azul . . . . .	14