

Apellidos	Nombre	Matrícula	Nota
Buitrago López	Marco Antonio	21389	
Rodríguez Gramún	Irene	20286	
Campillos Vega	Sergio	19705	
Paz Martin	Jorge	19282	

CICLO DE HISTÉRESIS

1.Introducción

Los materiales tienen **distinto comportamiento** cuando se les somete a un **campo magnético**. Se pueden diferenciar en **diamagnéticos**, **paramagnéticos** y **ferromagnéticos** y la relación que tengan con H , **lineales** o **no lineales**.

En esta práctica vamos a **estudiar el ciclo de histéresis de un núcleo de hierro** (material ferromagnético). Para ello vamos a emplear una **fuerza de tensión variable** conectada a un **transformador**. Mientras que el **devanado primario** se **conectará con el circuito eléctrico**, en el devanado secundario **se conectará a otro** en el cual se **medirá la caída de tensión**.

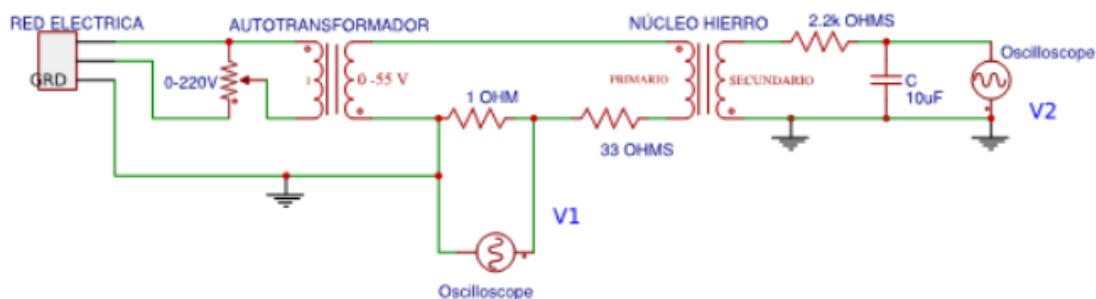


Figura 2.3: Esquema circuito para el estudio del ciclo de histéresis.

Los datos se recopilarán a través de un **osciloscopio y un software** y se manipularán con el programa **Microsoft Excel** para **obtener el ciclo de histéresis**. Todo el proceso se repetirá un total de **cinco veces** bajo **diferentes condiciones**.

2.Fundamento teórico

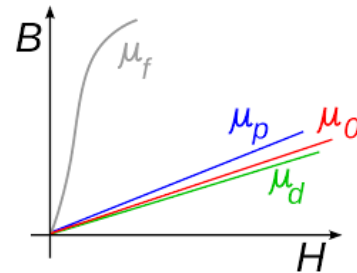
Los materiales magnéticos se pueden clasificar en:

- **Diamagnéticos:** Repelen los campos magnéticos externos ($\chi_m < 0$) como el cobre o el hidrógeno. Es un fenómeno que es muy débil pero tiene importantes aplicaciones en la levitación magnética.
- **Paramagnéticos:** Son atraídos por el campo magnético ($\chi_m > 0$) como el aluminio o el oxígeno (diatómico y líquido).
- **Ferromagnéticos:** Son materiales teóricamente paramagnéticos pero muy fuertemente atraídos por el campo externo ($\chi_m \gg 0$). Algunos ejemplos conocidos son el hierro o el cobalto.

Los diamagnéticos y paramagnéticos a veces se engloban y se les denomina **amagnéticos** ya que sus permeabilidades magnéticas apenas se distancian del valor de la del vacío.

Por otra parte los medios materiales pueden clasificarse en dos tipos de medios:

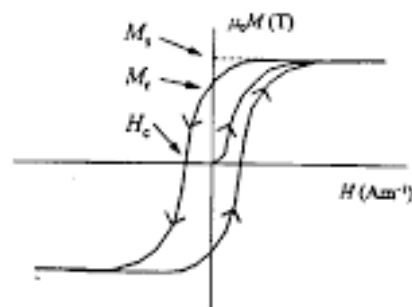
- **Lineales:** donde las permeabilidades y susceptibilidades magnéticas son constantes. Al ser constantes, la relación se representa como una recta.
- **No lineales:** cuando dichos parámetros dependen de H , y por ende de B . Comparado con la primera clasificación, ya no tendría forma de recta, sino de curva.



En nuestra práctica el material que vamos a emplear como objeto de estudio será un **ferromagnético no lineal**.

Los materiales magnéticos se componen de dominios magnéticos, que son regiones cuyos momentos magnéticos tienen dirección uniforme. Cuando le aplicamos un campo magnético estos se alinean y toman el sentido del campo a medida que aumenta. En una primera fase del proceso es reversible, pero **si el campo sigue aumentando deja de serlo**. Una vez se reorientan se alcanza la **imanación de saturación**, punto donde aunque aumentemos H no se apreciará ningún cambio. Si se elimina el campo una vez alcanzada la fase de irreversibilidad el material **quedará imantado permanentemente (imanación remanente)** o dicho de otro modo, tenemos un imán. Si queremos anular esta nueva propiedad, se tendrá que aplicar un campo que se oponga, denominado **campo coercitivo**, que hará que los dominios se orienten aleatoriamente. Si seguimos aumentando una vez alcanzado el campo coercitivo entonces **volveremos a darle un nuevo valor a la imantación**.

Todo este proceso, al ser irreversible, **consume energía disipada en forma de calor** en el núcleo ferromagnético y **tiene relación con el área que encierran las curvas que representan la relación de $B - H$, o $M - H$** . Dicha representación traza un bucle que se le denomina **ciclo de histéresis**.



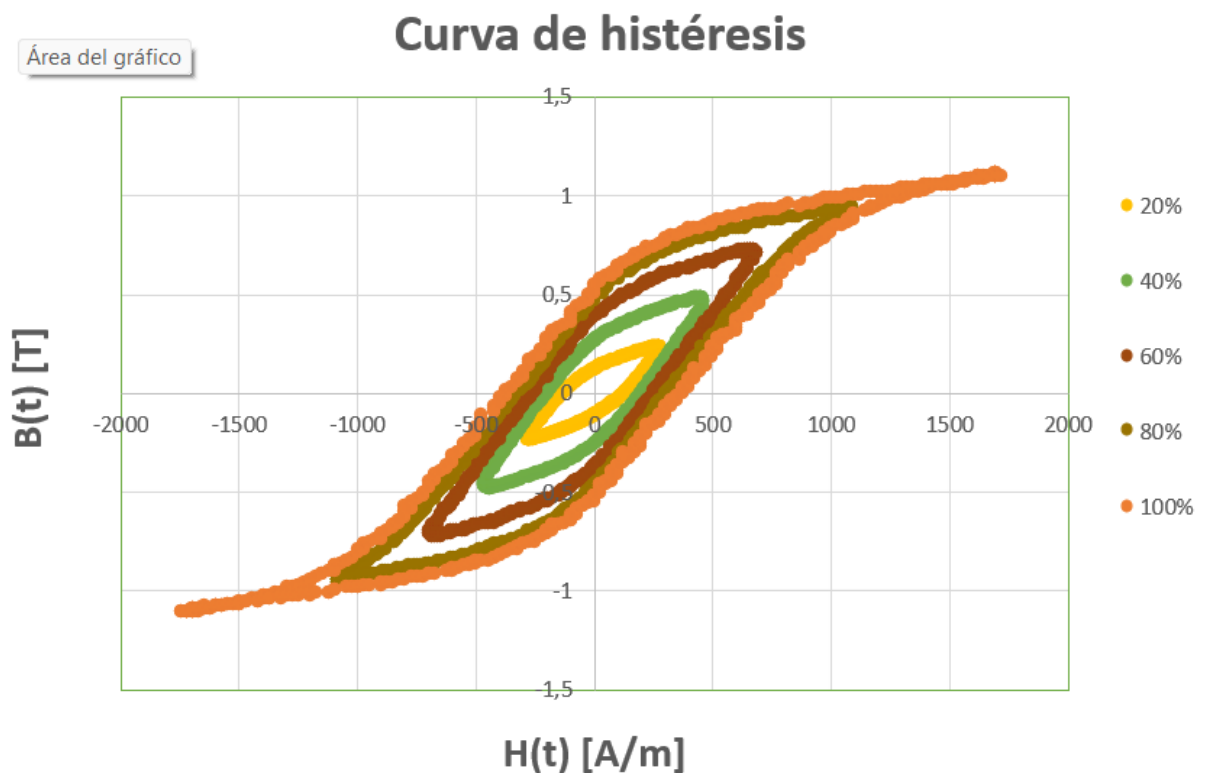
Parámetros fundamentales del ciclo de histéresis

- $M_s \rightarrow$ Imanación de saturación
- $M_r \rightarrow$ Imanación de remanencia
- $H_c \rightarrow$ Campo coercitivo

Cuanto **mayor sea la magnetización remanente mayor es el ciclo de histéresis** (por ejemplo, se aplican para imanes permanentes) y menor cuanto menor sea el bucle (ideal para transformadores y motores). Obviamente, si aportamos el calor al material podremos desplazarnos por la curva de histéresis.

3.Resultados

3.1 Familia de curvas de histéresis



Para elaborar la familia de curvas se ha empleado el programa Microsoft Excel.

Se observa que al aumentar la tensión de la fuente, el ciclo de histéresis se ensancha, lo que implica que al aumentar la tensión aumenta la energía disipada por ciclo.

Cabe resaltar que la curva de histéresis para el 80% es muy próxima a la del 100%.

3.2 M_s , M_r , B_r y H_c

Para el cálculo de M , H y B hemos empleado la siguiente ecuación:

$$B = \mu_o \cdot (M + H) = \mu_o \cdot H \cdot (X_m + 1) = \mu_o \cdot \mu_r \cdot H$$

Para calcular las incertidumbres hemos procurado escoger puntos que cumplieren las condiciones requeridas de M_s , M_r , B_r y H_c . Con ellos, hemos calculado las incertidumbres correspondientes.

M_s	$U M_s$	$\% u M_s$
(A/m)	(A/m)	-
870050.88	87349.83	5.02

M_r	$U M_r$	$\% u M_r$	B_r	$U B_r$	$\% u B_r$
(A/m)	(A/m)	-	(T)	(T)	-
424988.047	47909.31	5.03	0.534057	0.0538	5.03

H_c	$U H_c$	$\% u H_c$
(A/m)	(A/m)	-
374.80938	83.955	11.20

Como se puede observar en la gráfica los puntos se aproximan a la curva teórica del ciclo de histéresis. Nos hemos basado en tres puntos clave del ciclo de histéresis para el cálculo de las variables pedidas. Para M_s , utilizamos el punto donde los momentos magnéticos están orientados hacia H (Punto de intensidad magnética máxima). Para el cálculo de M_r y B_r hemos utilizado el punto en donde la intensidad magnética es nula y mantiene dicha magnetización (Punto de remanencia). Como último cálculo, H_c , el punto corresponde a la caída de tensión en el condensador cuando es nula y por lo tanto hace que la inducción magnética también lo sea (Punto de coercitividad).

Sin embargo existen algunos puntos que se distancian ligeramente de la trayectoria que debería seguir teóricamente y por ello existen incertidumbres relativas. Todo ello se puede deber a que:

- La tensión con la que se alimenta el núcleo es variable y puede sufrir algún pico en algún momento del proceso.
- Reluctancia del hierro.
- Se han hecho medidas aproximadas de las resistencias.

Para calcular las incertidumbres se ha empleado el siguiente código de MATLAB:

```

1 - clear all; close all; clc;
2 - %Datos
3 - N1=400; R1=1; l=0.29; N2=200; R2=2200;
4 - C2=10.^-5; A=3.61.*(10.^-4);
5 - uV1=0.01; uR1=0.1; u1=0.01; uV2=0.01;
6 - uR2=0.1; uC2=5.*(10.^-7); uA=5.*(10.^-7);
7 - mu0=4.*pi().*(10.^-7); %permeabilidad del vacío
8
9 - %Puntos escogidos de la curva de histéresis a V 100%
10 - Ms=870050.88; Mr=424988.047; Br=0.534057; Hc=374.80938;
11
12 - %Tensiones V1 y V2 de cada punto correspondiente
13 - V1Ms=1.24723; V2Ms=3.595386; V1Mr=0.000723; V2Mr=1.752678;
14 - V1Br=0.000732; V2Br=1.752678; V1Hc=0.271737; V2Hc=0;
15 - V1Hs=V1Ms; V2Bs=V2Ms; V1Hr=V1Mr;
16
17 - %Cálculo de u_Hc
18 - uHc=sqrt(((N1/(1*R1))^2*(uV1^2))+(((N1*V1Hc)/((1^2)*R1))^2*(u1^2))...
19 - +(((N1*V1Hc)/(1*(R1^2)))^2*(uR1^2)))
20 - UHc=2*uHc %Incertidumbre expandida con K=2 confianza 95
21 - porcuHc=(uHc/Hc)*100 %Porcentaje de u_Hc con respecto a Hc
22
23 - %Cálculo de u_Hs
24 - uHs=sqrt(((N1/(1*R1))^2*(uV1^2))+(((N1*V1Hs)/((1^2)*R1))^2*(u1^2))...
25 - +(((N1*V1Hs)/(1*(R1^2)))^2*(uR1^2)));
26
27 - %Cálculo de u_Hr
28 - uHr=sqrt(((N1/(1*R1))^2*(uV1^2))+(((N1*V1Hr)/((1^2)*R1))^2*(u1^2))...
29 - +(((N1*V1Hr)/(1*(R1^2)))^2*(uR1^2)));
30
31 - %Cálculo de u_Br
32 - uBr=sqrt(((R2*C2)/(A*N2))^2*(uV2^2)+((C2*V2Br)/(A*N2))^2*(uR2^2)...
33 - +((R2*V2Br)/(A*N2))^2*(uC2^2)+((R2*V2Br*C2)/((A^2)*N2))^2*(uA^2))
34 - UBr=2*uBr %Incertidumbre expandida con K=2 confianza 95
35 - porcuBr=(uBr/Br)*100 %Porcentaje de u_Br con respecto a Br
36
37 - %Cálculo de u_Bs
38 - uBs=sqrt(((R2*C2)/(A*N2))^2*(uV2^2)+((C2*V2Bs)/(A*N2))^2*(uR2^2)...
39 - +((R2*V2Bs)/(A*N2))^2*(uC2^2)+((R2*V2Bs*C2)/((A^2)*N2))^2*(uA^2));
40
41 - %Cálculo de u_Ms
42 - uMs=sqrt(((1/mu0)^2*(uBs^2)+(uHs^2))
43 - UMs=2*uMs %Incertidumbre expandida con K=2 confianza 95
44 - porcuMs=(uMs/Ms)*100 %Porcentaje de u_Ms con respecto a Ms
45
46 - %Cálculo de u_Mr
47 - uMr=sqrt(((1/mu0)^2*(uBr^2)+(uHr^2))
48 - UMr=2*uMr %Incertidumbre expandida con K=2 confianza 95
49 - porcuMr=(uMr/Mr)*100 %Porcentaje de u_Mr con respecto a Mr

```

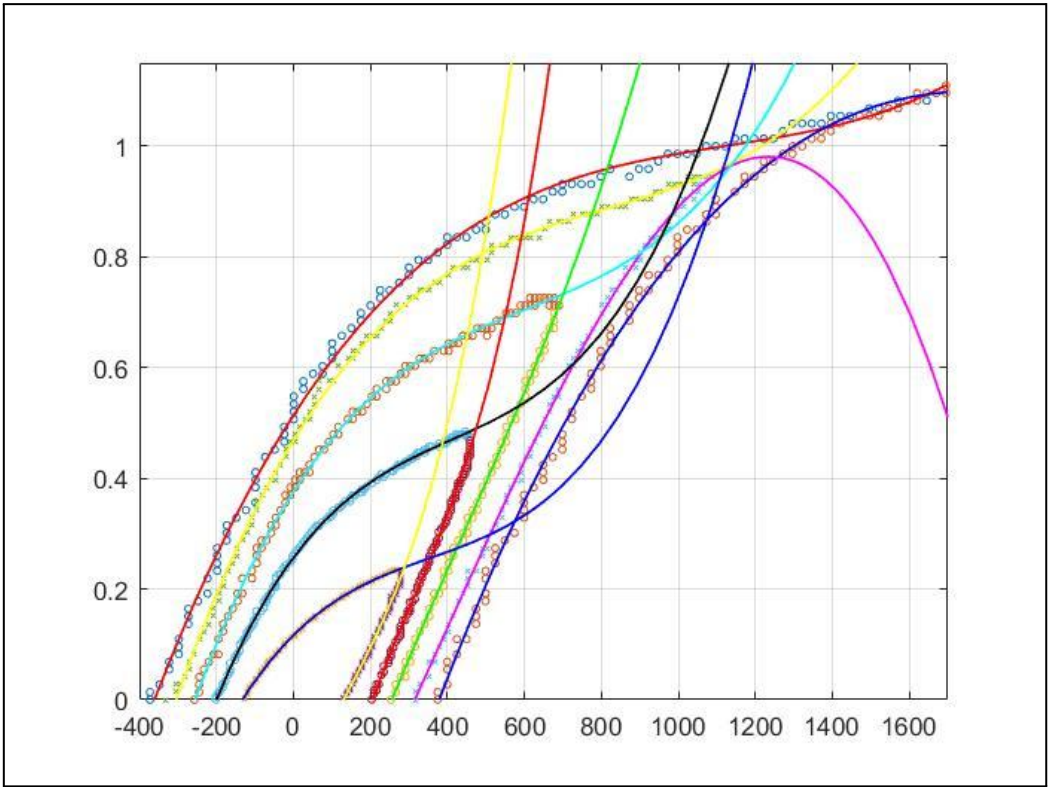
3.3 Cálculo de la energía disipada por ciclo y la potencia

El área que encierra el ciclo es la energía que emplea para imanarse y desimanarse. Para calcular la energía disipada se ha escogido el primer y segundo cuadrante de la gráfica del ciclo de histéresis. De este modo quedan dos curvas las cuales se pueden aproximar cada una con un polinomio de grado tres que pase por la nube de puntos. Y para ello hemos empleado MATLAB.

Imagen del código empleado:

```
1 - clear all; close all; clc;
2 - format long
3 - syms x
4 - sec=3.61.*(10.^-4); %Sección del núcleo del hierro
5 - l=0.29; % longitu del núcleo de hierro
6 - f=50; %frecuencia
7 - %Curva 1 100%
8 - j=importdata('datoscl1.txt'); %datos desde el punto -Hc hasta la saturación
9 - u=importdata('datoscl2.txt'); %nube de puntos desde Hc hasta el punto de satu
10 - %ración
11 - L=j(:,1); M=j(:,2);
12 - LL=u(:,1); MM=u(:,2);
13 - plot(L,M,'o','markersize',3) %Nube de puntos desde -Hc hasta el punto de
14 - %saturación
15 - hold on
16 - plot(LL,MM,'o','markersize',3) %Gráfica de medio ciclo desde -Hc hasta Hc
17 - k=polyfit(L,M,3); %Obtención de un polinomio que se aproxima por la nube
18 - %de puntos de -Hc a (Hs,Bs)
19 - p=polyfit(LL,MM,3); %Obtención de un polinomio que se aproxima por la nube
20 - %de puntos de Hc a (Hs,Bs)
21 - K=poly2sym(k); %transformación de notación, de vector a simbólico
22 - P=poly2sym(p);
23 - fplot(K,'r','linewidth',1) %Gráfica del polinomio hallado
24 - fplot(P,'b','linewidth',1)
25 - xlim([-400 1700])
26 - ylim([0 1.15])
27 - grid on
28 - %Límites de integración. Se obtienen observanod la gráfica
29 - a1=-372.62; %Hc
30 - b1=1377.24; %Hs
31 - a2=374.809; %Hc
32 - b2=b1;
33 - %Cálculo de la energía disipada por volumen
34 - q1=polyint(k);
35 - I1 = diff(polyval(q1,[a1 b1]));
36 - q2=polyint(p);
37 - I2 = diff(polyval(q2,[a2 b2]));
38 - Area_totall=2*(I1-I2) %Como la curva es simétrica, al calcular el área
39 - %por encima del eje X, para hallar la total solo es
40 - %multiplicara por 2
41 - E1=Area_totall*sec*1 %Cálculo de la energía disipada
42 - P1=E1*f %Cálculo de la potencia
```

Esta sería la aproximación de las curvas:



Y análogamente se hace para el resto de curvas.

Una vez halladas las funciones se calcula el área que encierran en el primer y segundo cuadrante. De este modo, hallamos la energía por metro cúbico. Y para hallar la energía se multiplica por la sección del núcleo magnético y la longitud media del toroide.

$$E = u_m \cdot A_{\text{toroide}} \cdot l$$

Por otro lado, la potencia se calcula multiplicando la energía obtenida por la frecuencia, que en este caso es 50 hercios.

$$P = E \cdot f$$

% Fuente	e =E/V	E	P
	[J/m^3]	[J]	[J/s]
100	1350.62	0.141	7.070
80	1031.99	0.108	5.402

60	625.63	0.06550	3.275
40	307.76	0.03222	1.611
20	90.06	9.429E-3	0.471

Se observa que a medida que aumenta la tensión de la fuente, hay mayor densidad de energía y por ende mayor energía y potencia. Sin embargo, este aumento no es lineal como se observa en la tabla, debido a que las curvas de histéresis no son lineales.

4. Conclusiones

Las conclusiones se han ido escribiendo a medida que se ha ido desarrollando el trabajo.

5. Cuestiones

1. ¿Cuál es el origen del comportamiento no lineal de los materiales ferromagnéticos?

El comportamiento no lineal se debe a las irreversibilidades que se producen al aumentar el campo magnético. Al principio es cierto que es un proceso reversible, pero a medida que se aumenta el campo magnético, los dominios magnéticos se orientan al campo. El proceso para revertir a la situación inicial es irreversible, por lo que la relación deja de ser lineal y por ello queda una magnetización remanente que solo se anula si se induce un campo magnético opuesto.

2. ¿Qué es una pared de Bloch? Físicamente ¿qué implica que existan?

La pared de los dominios magnéticos está definida por regiones donde convergen dos dominios magnéticos que apuntan en distintas direcciones o con diferente magnetización. Esto implica la existencia de un tipo de interfase, que denominaremos pared. Según cómo se reorientan los dipolos de un dominio a otro se puede clasificar en:

- **Pared de Néel:** los campos rotan en un plano **perpendicular** al límite.
- **Pared de Bloch:** los campos rotan en un plano **paralelo** al límite.

3. ¿Qué diferencias hay entre un material ferromagnético “blando” y un material ferromagnético “duro”?

Un **material ferromagnético blando** es aquel que al aplicarle un campo magnético débil se desmagnetiza con facilidad o que su ciclo de histéresis **es muy estrecho (magnetización remanente baja)**. Por otro lado, **los duros** no se desmagnetizan con facilidad por lo que su ciclo de histéresis **es más ancho (magnetización remanente alta)**.

El hecho de que clasifiquen de este modo depende de la **dificultad para reorientar los dominios magnéticos**.

4. ¿Cuál de los anteriores elegiría para fabricar el núcleo de un transformador? ¿por qué?

Teniendo en cuenta que:

- El transformador estará **sometido a un campo magnético variable** generado por una bobina conectada a un circuito de corriente alterna.
- **No** solo el núcleo magnético **será el único material magnético** presente en la estructura.
- No interesa que se caliente y por ello **se produzcan pérdidas** y disminuya su rendimiento.

El tipo de material ferromagnético que escogería **sería blando**. Un ejemplo de este material sería el hierro.

5. ¿Cuál de los anteriores elegiría para construir un micrófono? ¿por qué?

Para la construcción del micrófono y su correcto funcionamiento, tendría que ser duro y un **imán permanente**, por lo que el material que mejor cuadra en estas características es un **ferromagnético duro**.

6. Si un material ferromagnético mantiene magnetización remanente en ausencia de campo magnético defina dos métodos diferentes para desmagnetizar un material ferromagnético previamente magnetizado.

Hay dos formas de poder desmagnetizar de manera correcta un material:

- Con **temperatura**, habrá que calentarlo hasta una temperatura a partir de la cual el material dejará de estar magnetizado total o parcialmente,

dependiendo de si la supera será total y si no será de manera parcial. Esta temperatura es denominada la **temperatura de Curie**.

- Un **campo magnético de orientación contraria a la inducida** haciendo que el material tuviese una intensidad de campo magnético nula ($B=0$).

7. ¿Qué recomendaría el alumno para mejorar la incertidumbre de los datos obtenidos?

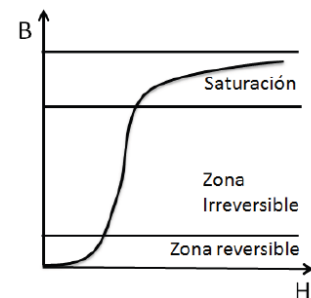
Observando los datos hemos llegado a la conclusión de que la mejor manera de poder bajar o mejorar la incertidumbre en los datos es corregir errores humanos, es decir, evitar aproximar los cálculos o mejorar nuestros elementos de medida intentando ser lo más preciso posible. Dados estos motivos y algunos otros es por lo que se obtiene una incertidumbre relativa tan alta.

8. Estimar un valor de μ_r (sin incertidumbre) en la configuración de saturación para el 100 % de tensión ¿Tiene sentido obtener una μ_r en otro punto? ¿Por qué?

Para obtener el valor de la permeabilidad relativa en algún punto debemos tener en cuenta que no va a ser constante ya que no es lineal.

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_o \cdot H}$$

Sin embargo en la zona de saturación apenas varía su valor por lo que podemos estimar uno para esa configuración. Para el punto $H = 1620,6386$ y $B = 1.09554$, punto que se encuentra en la zona de saturación



$$\mu_r = \frac{B}{\mu_o \cdot H} = \frac{1620.6386}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1.09554} = 537.9379$$

Por lo tanto, respondiendo a la pregunta no tiene sentido obtener la permeabilidad relativa dentro de la región de saturación.