

Ciclo de Histéresis en Materiales Ferromagnéticos

Marquez Da Silva, Guillermo Emanuel^a*, Nunes Velloso, Franco Valentino^a, Orczuk, Braian Andrés^a, Parfiniuk, Nahuel Adrian^a, Suárez, Martín Alejandro^a, Marco Paolo Barbaro^a, Leandro Javier Corado^a

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

e-mails: guillermoemanuel27@gmail.com, franvalnunesveloso@gmail.com, braian.orczuk@gmail.com, parfiniukadrian@gmail.com, suarezmartinalejandro3@gmail.com, marcobarbaro@fio.unam.edu.ar, leandro.corrado@fio.unam.edu.ar

Resumen

El objetivo principal de este artículo es plasmar y exponer de manera clara el comportamiento de los materiales ferromagnéticos cuando son sometidos a distintas magnitudes físicas y analizar el comportamiento de los mismos cuando se varía la intensidad de las anteriormente mencionadas. Como consecuencia se obtiene el Ciclo de Histéresis de estos materiales el cual se verá exhibido en las posteriores páginas.

Palabras Clave – *Campo Magnético, Experimentación, Histéresis, Magnetización, Materiales Ferromagnéticos.*

1 Introducción

El Ciclo de Histéresis es una propiedad intrínseca que poseen los materiales ferromagnéticos que son ampliamente utilizados por el ser humano.

Como consecuencia, en el presente informe se encuentra desarrollado contenido teórico referido al mismo, así como también, de forma clara y concisa la experiencia desarrollada para poder analizarlo en detalle.

Además se adjuntan imágenes y gráficas que ayudan a la interpretación del ensayo, siendo estas últimas, de vital importancia para una buena interpretación.

Se recomienda tener un conocimiento básico de electromagnetismo, así como también realizar una apropiada interpretación de los gráficos dispuestos durante todo el informe.

2 Marco Teórico

2.1 Materiales Magnéticos: Los **materiales magnéticos** son aquellos que responden a la aplicación de un campo magnético externo. La respuesta magnética de estos materiales se debe a la alineación y comportamiento de los momentos magnéticos atómicos individuales. Estos momentos magnéticos surgen principalmente por el espín de los electrones y el movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo. Cuando no está presente un campo magnético, los momentos magnéticos pueden no estar alineados, pero bajo algunas condiciones, pueden ordenarse y generar fenómenos magnéticos a nivel macroscópico, además, al momento de la aplicación de un campo magnético sobre un material, este se ve afectado, esto es un fenómeno conocido como imanación.

Los materiales magnéticos poseen características y propiedades únicas que les permiten interactuar con campos magnéticos. Una propiedad clave es la permeabilidad magnética, que mide la facilidad de magnetización del material, otra propiedad de suma importancia es la susceptibilidad magnética, que indica la respuesta del material a un campo magnético aplicado.

2.2 Curva de Imanación: Si aplicamos una intensidad de campo magnético H creciente a una cantidad de material ferromagnético, y representamos la inducción magnética B en función de la intensidad de campo magnético H , obtenemos la llamada curva de imanación o magnetización del material:

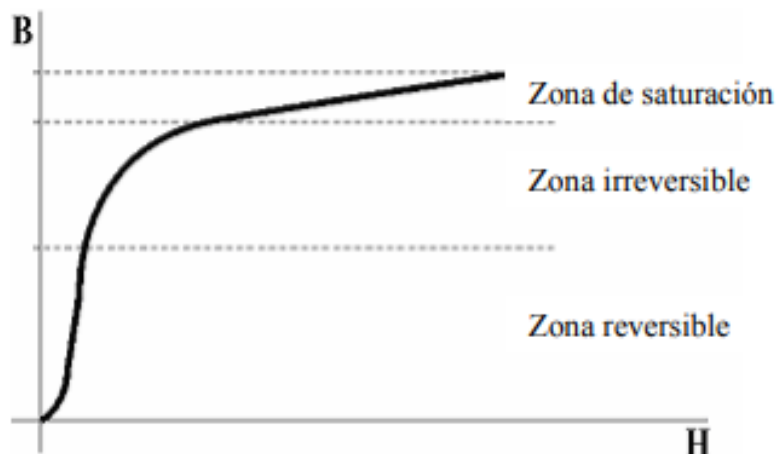
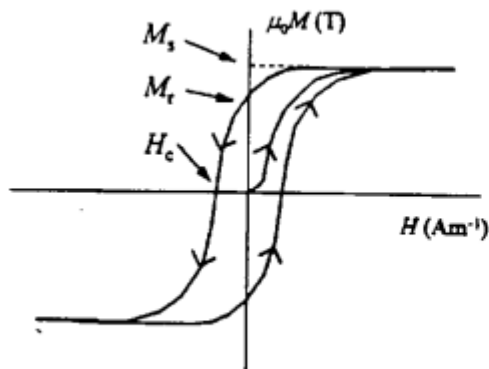


Fig 1: Curva de imanación.

En dicha curva, se pueden distinguir tres partes claramente diferenciadas. Se observan: una primera zona reversible o también denominada **zona lineal**, en la cual si eliminamos el campo H exterior, la densidad de flujo también desaparece; una segunda zona irreversible o **zona parabólica**, que nos indica que aquellos dominios que inicialmente ya estaban orientados a favor del campo magnético externo empiezan a crecer a costa de los dominios próximos que no estaban orientados favorablemente y, una última parte, que representa la **zona de saturación**, en la cual la permeabilidad relativa es unitaria. La curva de imanación representa la primera magnetización del material, es una curva que inicia en el origen y muestra cómo B aumenta con H hasta que el material alcanza su saturación magnética.

2.3 Ciclo de Histéresis: Cuando se aplica un campo suficientemente intenso, se alcanza la **imanación de saturación**, denotada como " M_s ", la cual ocurre cuando todos los momentos magnéticos están alineados en la dirección del campo aplicado. Posteriormente, cuando la imanación disminuye pero no llega a un valor nulo (cuando $H=0$), la muestra retiene una imanación conocida como " M_r ", o **imanación remanente**. Si se incrementa el campo magnético en sentido negativo, la imanación continúa disminuyendo hasta que se anula. El campo requerido para anular la imanación se llama **campo coercitivo intrínseco**, " H_c ". Al seguir aumentando el campo en sentido negativo, se alcanza nuevamente el estado de saturación pero en la dirección opuesta a la inicial. A medida que el campo magnético sigue aumentando en esta nueva dirección, los dominios magnéticos se realinean en la dirección del campo, alcanzando eventualmente la saturación en sentido contrario, completando así el ciclo.



Parámetros fundamentales del ciclo de histéresis

M_s → Imanación de saturación
 M_r → Imanación de remanencia
 H_c → Campo coercitivo

Fig 2: Representación esquemática del ciclo de histéresis de un material ferromagnético.

Podemos observar entonces que realizando la variación de H en sentidos inversos, se obtiene el llamado ciclo de histéresis del material.

El ciclo de histéresis es una característica fundamental de los materiales ferromagnéticos y describe cómo estos materiales responden a la aplicación y remoción de un campo magnético externo. La histéresis es un fenómeno en el cual la imanación de un material depende no solo del campo magnético actual, sino también de la historia previa de la aplicación del campo. Este comportamiento se debe a la interacción entre los momentos magnéticos individuales y la estructura interna del material, además, podemos objetar que los materiales ferromagnéticos con mucha histéresis se denominan duros y los que tienen poca histéresis se denominan blandos o dulces.

2.4 Tipos de ciclos de histéresis:

Ciclo de Histéresis Estrecho: Característico de los materiales magnéticamente blandos. En aplicaciones como núcleos de transformadores y motores, es deseable un ciclo de histéresis estrecho para minimizar las pérdidas de energía, ya que la energía para invertir la polaridad del campo magnético es menor a uno con el ciclo de histéresis ancho. Los materiales con ciclos de histéresis estrechos tienden a tener bajos valores de campo coercitivo y son más eficientes en términos de energía.

Ciclo de Histéresis Ancho: Magnéticamente Duro. Para imanes permanentes, se prefiere un ciclo de histéresis amplio, ya que estos materiales deben mantener una alta imanación remanente y requerir un campo fuerte para ser desmagnetizados. Esto asegura que el imán permanezca magnetizado en diversas condiciones operativas, ya que la energía almacenada en estos es mayor.

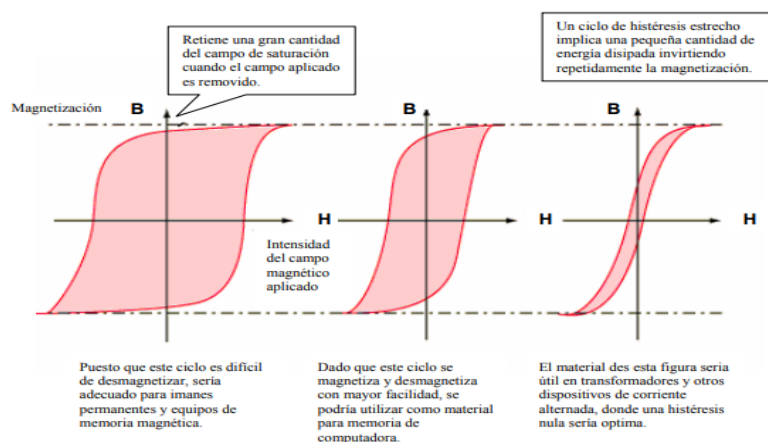


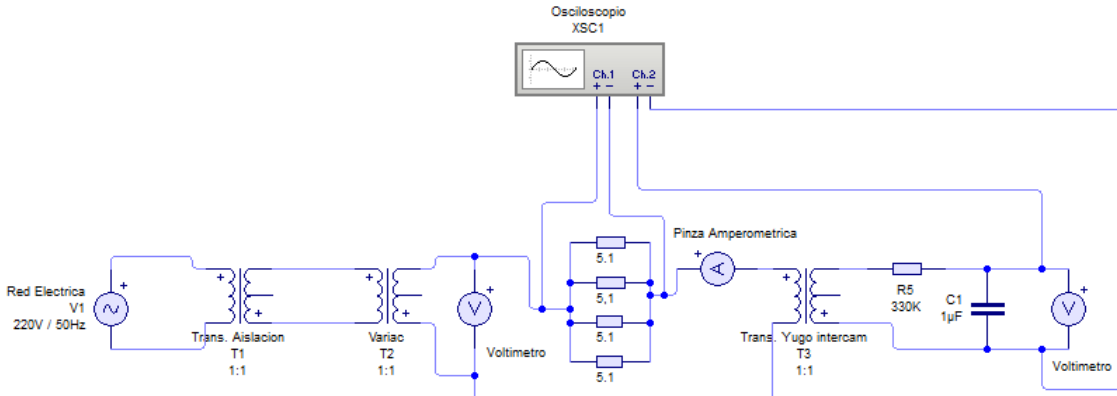
Fig. 3. Ciclos de histéresis y su posible uso en distintas aplicaciones.

2 Metodología

Para analizar el ciclo de histéresis, el montaje experimental incluyó un transformador de aislamiento conectado a la red alterna, y un autotransformador variable (variaco) que permitió ajustar la tensión de entrada al devanado primario del transformador de yugo intercambiable. Inicialmente, se utilizó un yugo laminado, y posteriormente un yugo macizo. En ambos casos, se usaron cuatro resistencias de $5.1 \text{ } [\Omega]$ conectadas en paralelo, una resistencia de $330 \text{ } [k\Omega]$, un condensador de $1 \text{ } [\mu F]$, y un osciloscopio de dos canales.

Las resistencias en paralelo se conectaron en serie con el primario del transformador. El transformador se alimentó con voltaje alterno del autotransformador, y se midieron la tensión de entrada, la corriente en el primario y la tensión de salida utilizando voltímetros analógicos y una pinza amperimétrica, respectivamente.

Fig. 4.



Esquema eléctrico del circuito en detalle.

Tabla 2 -Instrumentos Empleados

Instrumento / Componente	Cantidad	N° de Inventario
Voltímetro	2	0059910/0058949
Pinza Amperométrica	1	0095508
Transformador De Aislación	1	N/A
Autotransformador Variable (Variac)	1	FI 2476
Transformador De Yugo Intercambiable	1	FI 609
Bobinas de 300 Espiras	2	N/A
Yugo Macizo	1	N/A
Yugo Laminado	1	N/A
Osciloscopio Digital OWON	1	0081084
Resistencia 5,1Ω/7W	4	N/A
Resistencia 330kΩ/0,5W	1	N/A
Capacitor Poliester 1μF/630V	1	N/A

Cabe destacar las siguientes consideraciones, se colocó un capacitor para relacionar la tensión de salida con la inducción magnética, dado que la carga en el devanado secundario del transformador es muy pequeña, la corriente secundaria es despreciable. Por lo tanto, la corriente total del circuito se simplifica siendo igual a la corriente en el vacío. Tomando en cuenta estas consideraciones, la intensidad de campo magnético será proporcional a la corriente de entrada del transformador, además, dado que en el canal primario del osciloscopio, estamos midiendo la tensión de entrada, que se puede determinar utilizando la Ley de Ohm, se obtiene una onda proporcional a la intensidad del campo magnético en el eje de abscisas, permitiendo representar tanto la tensión como la corriente en función de la intensidad de campo

magnético.

Pudiendo destacar las siguientes observaciones, en el yugo laminado, al aumentar la tensión, la corriente en el primario también aumenta, pero, respecto al yugo macizo, la corriente se disparaba a baja tensión, requiriendo más energía y produciendo mayores pérdidas y calentamiento. El yugo laminado en nuestra experimentación es capaz de alcanzar la saturación, mientras que el yugo macizo no, debido a la alta corriente necesaria que las resistencias no pueden soportar.

4 Gráficos e imágenes de la experimentación

Durante el experimento se realizaron grabaciones y capturas de imágenes a las distintas curvas mostradas en el osciloscopio, las cuales se especifican a continuación.

Como se mencionó anteriormente $H(t) \propto I_1(t)$, y como la carga en el circuito primario es una carga puramente resistiva al obtener la curva de caídas de tensión en las resistencias del primario $V_R(t)$, vamos a estar midiendo una forma de onda que es proporcional a $H(t)$ en el eje x, el cual es nuestro propósito del experimento. Esta medición se realizó en el canal uno (ch1) del osciloscopio (curva roja).

Además como se desarrolló en los conceptos teóricos anteriores, al medir la caída de tensión en el capacitor, vamos a obtener una curva que es proporcional al campo magnético B , por lo tanto $B(t) \propto V_C(t)$, la misma se midió en el canal dos (ch2) del osciloscopio, por lo tanto se obtuvo una curva proporcional al campo magnético (curva amarilla).

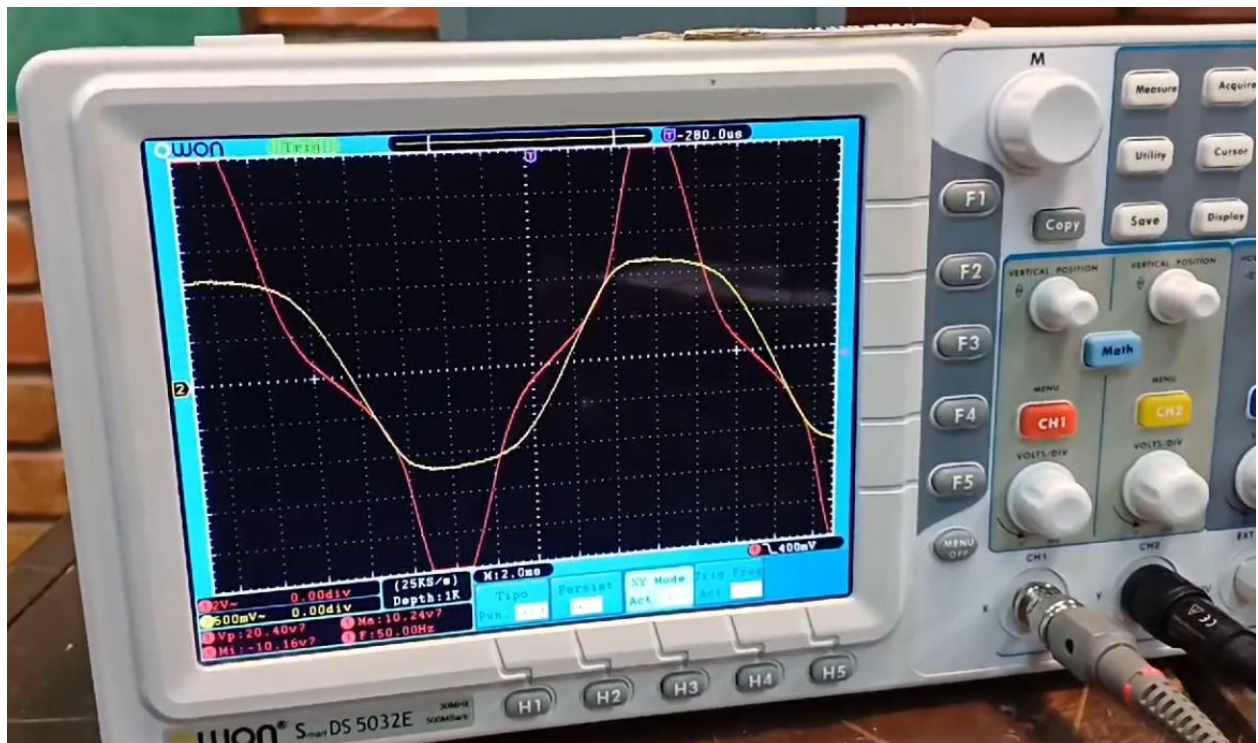


Fig. 5. Saturación del yugo laminado, vista en la tensión de la resistencia.

Para la visualización del ciclo de histéresis, el oscilador pone en el eje horizontal los valores de tensión instantáneos obtenidos en el canal uno, es decir de la resistencia, para obtener en este eje los valores proporcionales de Inducción Magnética. En el eje vertical se disponen los valores instantáneos de la caída de tensión en el capacitor del canal 2, proporcional a la magnitud del campo magnético.

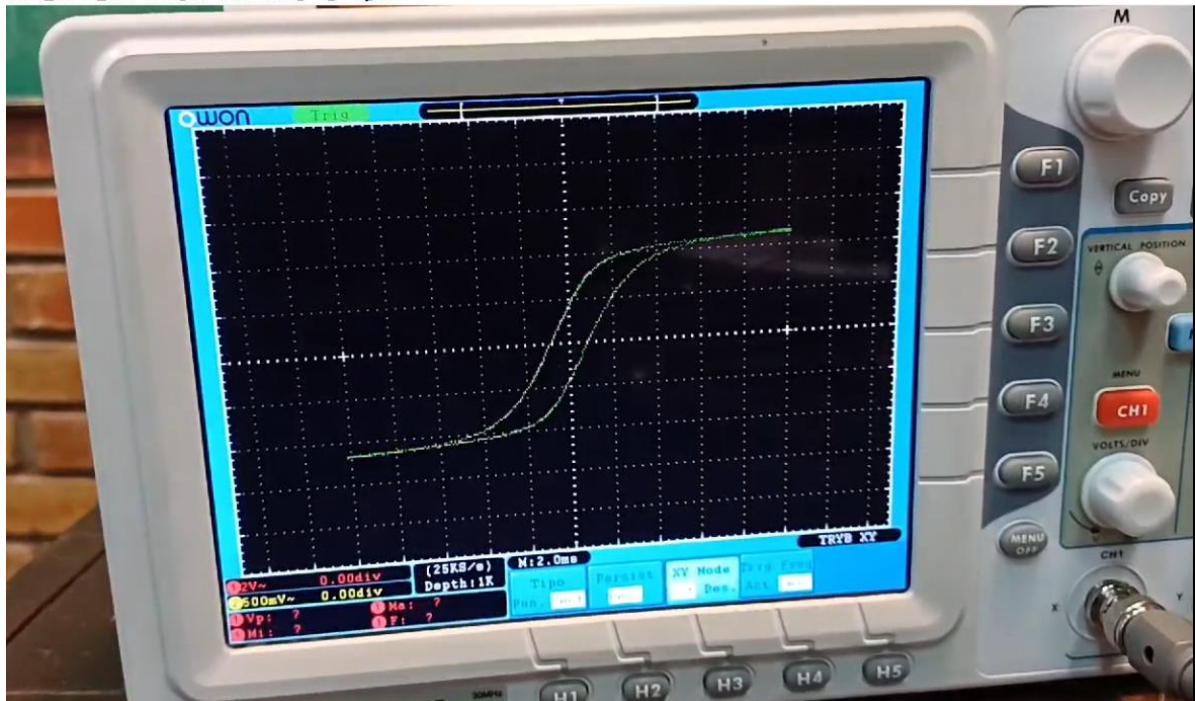


Fig. 6. Curva de Histéresis Yugo Laminado.

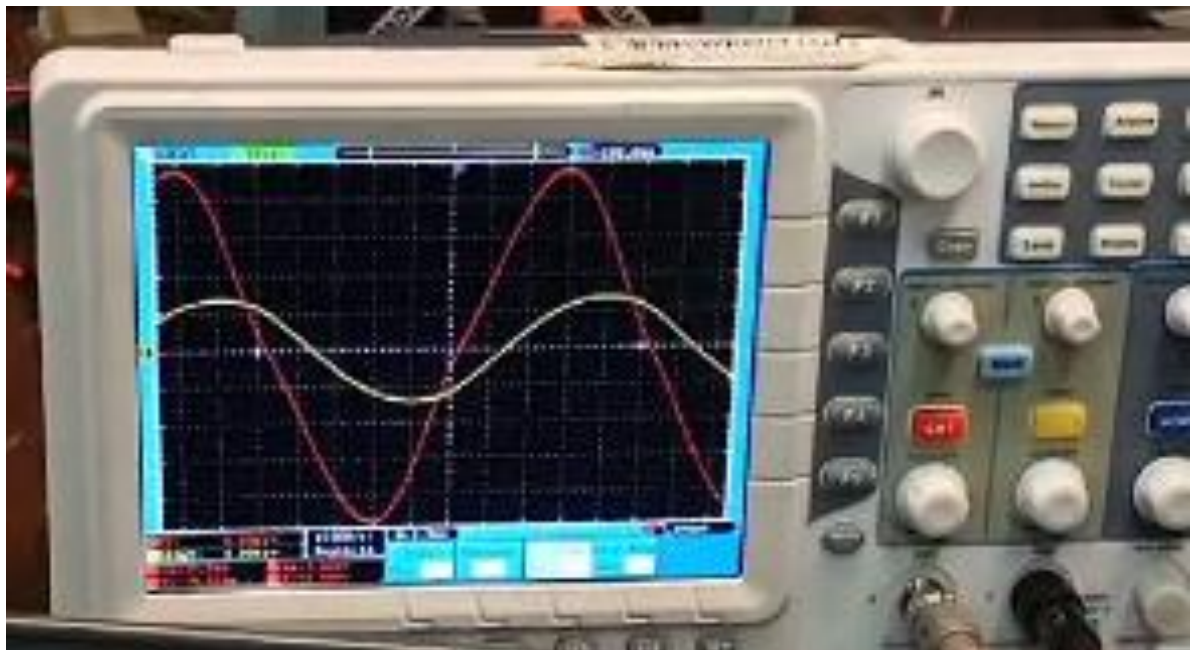


Fig. 7. Últimas Tensiones Experimentadas Yugo Macizo.

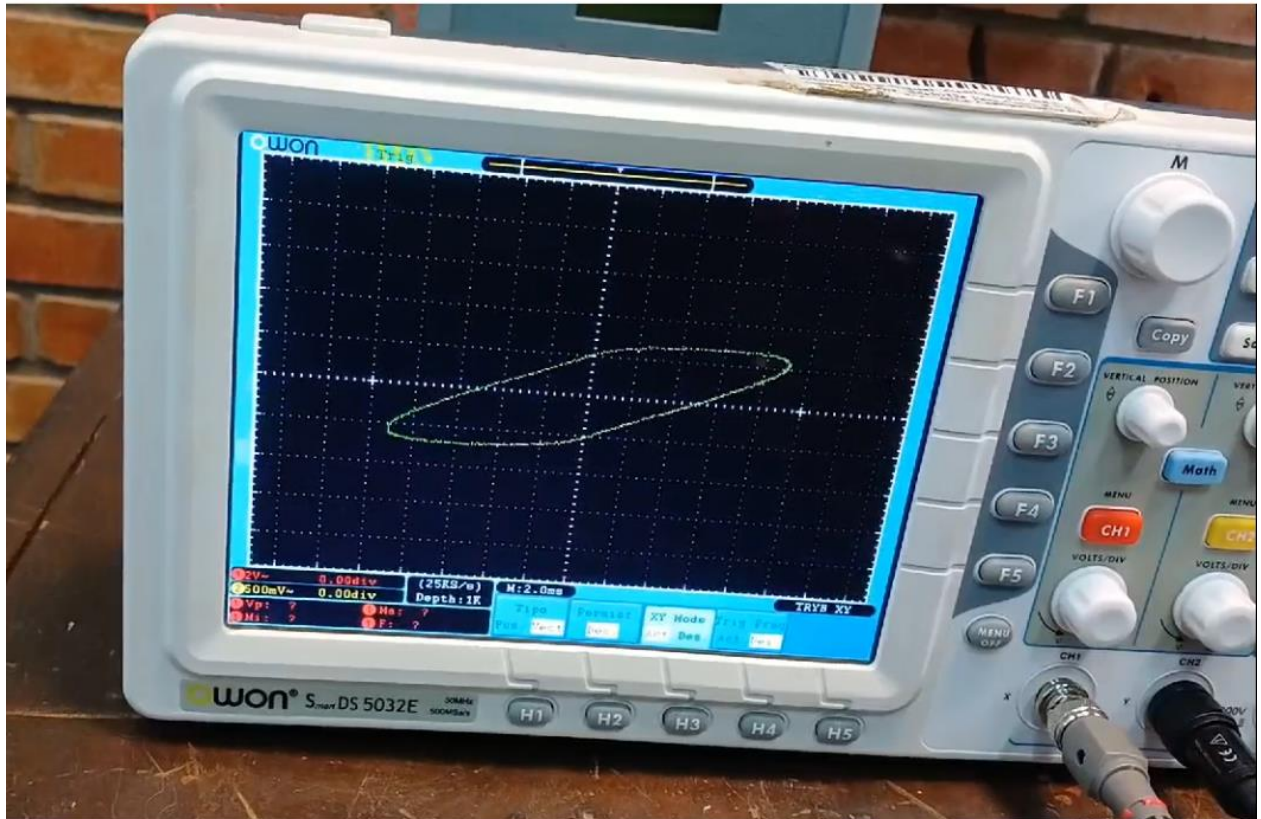


Fig. 8. Curva de Histéresis Yugo Macizo.

5 Conclusión

En el presente artículo se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo del ciclo de histéresis en materiales ferromagnéticos, enfocándose en la caracterización y descripción detallada del proceso de imantación y su correspondiente curva de histéresis. Se han definido y analizado las relaciones entre la inducción magnética (B) y la intensidad del campo magnético (H) mediante un procedimiento sistemático.

El desarrollo de este trabajo se basó en la aplicación de métodos experimentales precisos y en la utilización de instrumentación adecuada, destacando que los resultados obtenidos fueron consistentes con las expectativas.

Es fundamental, para futuras investigaciones, mejorar la utilización de las herramientas de medición y optimizar el proceso de análisis de datos.

Referencias

- [1] Fraile Mora, J, "Circuitos Magnéticos y Conversión de Energía," in *Máquinas Eléctricas*, 5th ed., Madrid, Spain: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2003, chapter 1, pp. 1–30.
- [2] Giancoli, Douglas C., "Fuentes de campo magnético," in *Física para Ciencias e Ingeniería con Física Moderna*, Vol 2, 4th ed., CDMX, México: Pearson Educación, 2009, chapter 28, pp. 748–750.
- [3] Leandro Carballo y Ramón Gómez, "Medición del ciclo de histéresis de un material ferromagnético", unpublished.