
ANALISIS DE LOS PROCESOS DE MAGNETIZACION DE LAS ALEACIONES AMORFAS APLICANDO EL MODELO ESTADISTICO DE PREISACH

ING. VLADIMIR SITNIKOV
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle
Departamento de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
Instituto Energético de Moscú

ING. HÉCTOR CADAVID
Profesor Titular
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle

RESUMEN

Con base en el modelo estadístico de la histéresis-modelo modificado de Preisach, ha sido desarrollado un modelo matemático de los procesos de magnetización de las aleaciones amorfas, que permiten obtener las características dinámicas diferenciales considerando los efectos dinámicos de la histéresis. En el presente artículo se determinan las leyes de distribución de la función de Preisach y la Ley del movimiento del frente de magnetización en el caso de magnetización desde una fuente de corriente.

Se presentan los resultados del modelo por computador de los procesos de magnetización de distintas aleaciones amorfas con alto contenido de cobalto.

Palabras claves: *Leyes estadísticas, Aleaciones amorfas, Modelización de magnetización, Diagrama de Preisach.*

INTRODUCCION

En los últimos años ha ocurrido un cambio brusco en las áreas relacionadas con la utilización de elementos magnéticos en equipos eléctricos y electrónicos. Lo anterior se explica con base en los desarrollos de la tecnología de producción de materiales magnéticos, con la aparición de una nueva clase de materiales magnéticamente blandos -las aleaciones amorfas AA-, las cuales poseen una combinación única de características magnéticas, eléctricas y mecánicas.

Sin embargo, la máxima utilización de las AA aún está frenada por el desarrollo insuficiente de aportes teóricos, relacionados con la variedad de procesos de magnetización de los materiales de los núcleos en un amplio rango de frecuencias y en diferentes regímenes: régimen de magnetización total o parcial, régimen con distintas velocidades de magnetización, magnetización por la acción de fuentes de distinta forma, magnetización considerando la historia previa del material, etc.

Los métodos tradicionales de análisis de los procesos de magnetización (o de otras características dinámicas) son muy difíciles de implementar en la práctica, debido a que los regímenes de obtención de estas características, por regla, no corresponden a los regímenes de magnetización de los modernos equipos eléctricos y electrónicos [1,2]. Es necesario considerar el volumen total de las características dinámicas diferenciales tales como: variación de la velocidad de densidad de flujo, la resistencia de magnetización, coeficiente de conexión y otros, también la aparición dinámica de la histéresis. Esto fue posible con la utilización de los modernos computadores.

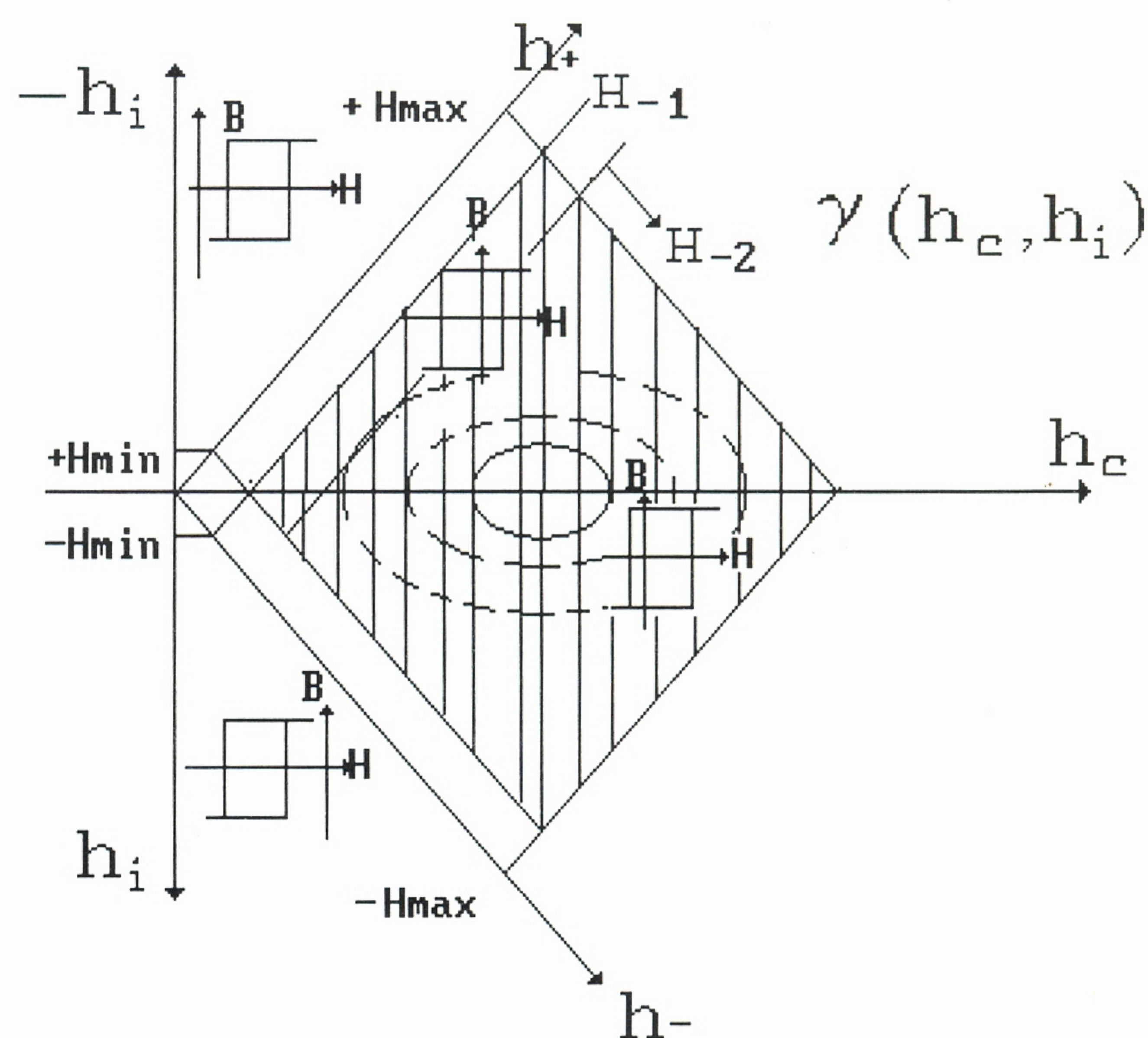
Para el análisis de los procesos de magnetización de las AA considerando las particularidades de, prácticamente, todos los regímenes se propone tomar como base el modelo estadístico de la histéresis, sustentado en el diagrama modificado de Preisach [3].

MODELO DE PREISACH

Si tomamos como base del modelo físico de magnetización de las AA, el modelo de magnetización por desplazamiento de la frontera de los dominios a 180 grados [4], entonces, tomando en el modelo de Preisach el proceso de

magnetización del material amorfo magnético se puede representar como la magnetización en serie de algunas áreas ficticias, que poseen cada una su curva rectangular de histéresis desplazada en el eje H [5]. Cada curva de estas está ligada con la distancia promedio del desplazamiento libre entre dos extremos de la frontera de los dominios y se caracteriza por el ancho del lazo h_c y la magnitud de su desplazamiento por el eje $B - h_i$ (figura 1). En este caso, la curva de magnetización del material, las características diferenciales y el surgimiento magnético de la histéresis pueden ser representados como la superposición de curvas elementales de histéresis de forma regular formando un conjunto de áreas ficticias, y el estado del núcleo puede ser descrito indicando cuál parte del plano del diagrama de Preisach (h_c, h_i) corresponde a la magnetización positiva y cuál a la negativa. En este caso, la función de distribución continua $\gamma(h_c, h_i)$ -densidad de probabilidad-, es la característica del material.

Figura 1. Diagrama de Preisach



La utilización de un instrumento como el modelo estadístico de Preisach para el análisis de los procesos de magnetización se justifica por las siguientes ventajas:

- la universalidad de su aplicación para el análisis de las características dinámicas y estáticas;

- la representación adecuada de la naturaleza física de la magnetización con los parámetros individuales de cada material magnético;
- desde posiciones únicas permite evaluar cualquier tipo de efecto, cualquier configuración del campo de magnetización, cualquier ley de magnetización;
- la posibilidad de evaluar cualquier desventaja tecnológica en la etapa de producción de los materiales magnéticos;
- permite la máxima posibilidad de pronosticar el comportamiento en distintos regímenes, ya que se realiza la abstracción de la representación física de los procesos de magnetización en un nivel matemático.

La integral de magnetización en el modelo inicial de Preisach se representa de la siguiente forma:

$$\Delta B = 2Bs \int_{\Omega} \int \gamma(h_c, h_i) dh_c dh_i$$

donde Bs es la densidad de saturación del material, $\gamma(h_c, h_i)$ la función de Preisach, que para el modelo modificado corresponde a la distancia libre de recorrido de la frontera formado a 180° .

Así como, por definición, cualquier función de Preisach se normaliza así:

$$\int_{\Omega} \int \gamma(h_c, h_i) = 1;$$

$$\int_0^{\infty} \gamma_c(h_c) = 1;$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \gamma_i(h_i) = 1$$

entonces existe la posibilidad de efectuar una correspondencia de los parámetros de la función de distribución de Preisach con el número de fronteras de los dominios.

MODELIZACION DE LOS PROCESOS DE MAGNETIZACION

Partiendo de la suposición de la estabilidad estática de la función $\gamma(h_c, h_i)$ (o sea la independencia de la función de Preisach de la integral de magnetización), la magnitud de la variación de la densidad de flujo en el núcleo bajo la acción de un campo H puede ser determinada integrando las funciones independientes:

$$\gamma(h_c, h_i) = \gamma_c(h_c) \gamma_i(h_i) \quad (1)$$

donde $\gamma_i(h_i)$ es la distribución por el campo de interacción y $\gamma_c(h_c)$ es la distribución por fuerzas coercitivas.

Correspondientemente, la expresión para $B(H)$ tiene la siguiente forma:

$$B(H) = 2Bs \int_{-\infty}^{\infty} \gamma_i(h_i) dh_i \int_0^{\infty} \gamma_c(h_c) dh_c \quad (2)$$

Para utilizar la relación (2) es necesario determinar las funciones analíticas apropiadas para la aproximación de la distribución $\gamma_i(h_i)$, $\gamma_c(h_c)$ que correspondan a la estabilidad estática de la función de Preisach. Las condiciones más completas de magnetización se representan en el caso de la distribución de campos h_c por la ley de Weibull y por los campos h_i por la ley normal:

$$\gamma_c(h_c) = \frac{\alpha}{(\vartheta - \xi)^\alpha} (h_c - \xi)^{\alpha-1} \exp \left[- \left(\frac{h_c - \xi}{\vartheta - \xi} \right)^\alpha \right] \quad (3)$$

donde α es el parámetro de forma, $(\vartheta - \xi)$ es el parámetro de escala, y ξ es el parámetro de corte;

$$\gamma_i(h_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(h_i - m_{hi})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (4)$$

donde σ es la dispersión; m_{hi} es la esperanza matemática.

Para el análisis de los procesos de magnetización de los AA en los campos, conmensurables con la magnitud de las fuerzas coercitivas, se puede tomar que $\xi = U$ y $m_{hi} = 0$.

Considerando (3) y (4), la función de distribución de Preisach toma la siguiente forma: (5)

$$\gamma(h_i) = \frac{\alpha}{\vartheta^\alpha} h_c^{\alpha-1} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\left(\frac{h_c}{\vartheta} \right)^\alpha \right] \exp \left(-\frac{h_i^2}{2\sigma^2} \right)$$

Para la determinación de las características diferenciales considerando los efectos dinámicos de la histéresis además de la función de distribución $\gamma(h_c, h_i)$, es necesario obtener la Ley del movimiento del frente de magnetización sobre el diagrama de Preisach. En el caso de magnetización, del material del núcleo desde una fuente de señal sinusoidal, la ley del movimiento del frente también será sinusoidal. Y en el caso de magnetización desde una fuente de Corriente Continua (lo que frecuentemente ocurre para amplificadores magnéticos y reactores de saturación), la ley del movimiento del frente se puede obtener de la ecuación general de la dinámica de magnetización [3]:

$$\frac{1}{\gamma(B)} \frac{dB}{dt} + H_{est}(B) = H(t) \quad (6)$$

donde $H_{est}(B)$ es la intensidad de campo en el ciclo estático.

Utilizando conversiones matemáticas simples obtenemos para este caso la ley del movimiento del frente de magnetización de forma exponencial:

$$H(t) = H_m \left(1 - e^{-\frac{t}{v}} \right) \quad (7)$$

Donde v es el coeficiente empírico para cada AA.

De esta manera, las características diferenciales de los AA en los casos reales pueden ser adecuadamente expresadas con la ayuda de la función de Preisach con densidad variable y con frente de magnetización desplazándose en el tiempo. Las ecuaciones (2), (5) y (7) representan en sí el modelo matemático de los procesos de magnetización de las AA, que tienen en cuenta la aparición de los efectos dinámicos de la histéresis a través de características diferenciales del material magnético.

En las **figuras 2-7** están representados los resultados de la modelización de los procesos de magnetización de núcleos toroidales de AA que contiene 84% de Cobalto.

Las curvas 2-4 están relacionadas con el caso de magnetización del campo en forma sinusoidal y las 5 a 7 en forma triangular con amplitud variable con el fin de obtener ciclos parciales de histéresis. También están representadas las curvas de histéresis en las coordenadas normalizadas, las características dinámicas diferenciales: velocidad de variación de la inducción $dB/dt = f(H)$, $H(t)$, y también los correspondientes diagramas de Preisach en el sistema de tres coordenadas. Los resultados de la modelización fueron comparados con datos experimentales obtenidos en equipos especiales, dedicados a la obtención de características dinámicas, que consisten en un generador de corriente, flujómetro y un potenciómetro de dos coordenadas. La diferencia entre los datos de cálculo y experimentales no supera el 15%, lo que significa un excelente indicador para características de este tipo.

CONCLUSIONES

1. Se muestra que la utilización de un método estadístico para el análisis de los procesos de magnetización de las AA permite obtener, con el mínimo de datos experimentales, características dinámicas diferenciales considerando la aparición de los efectos dinámicos de la histéresis.
2. Las leyes de distribución se obtuvieron para la función estadística de Preisach y la ley del movimiento del frente de magnetización en el caso de magnetización desde una fuente de corriente continua.

Por consiguiente, es importante resaltar que la universalidad de las leyes estadísticas permite esperanzarse en la difusión de los resultados obtenidos de la modelización para otros sistemas de histéresis. Por ejemplo, en un intelecto artificial, en sistemas hidráulicos, pendulares y otros.

RECONOCIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento al Profesor L. L. Khruslov por la dirección científica en este tema y al estudiante de Postgrado Smirnov V. K. por el trabajo de programación ♦

AUTORES

Vladimir F. Sitnikov

M.Sc, Ph.D Instituto Superior Energético de Moscú 1984, 1989.
Desde 1984 - Profesor de tiempo completo del Departamento de Aparatos Eléctricos y Electrónicos M.E.I.

Profesor visitante del Departamento de Electricidad, Facultad de Ingeniería Universidad del Valle desde 1993.

Autor de cerca de treinta artículos de investigación y posee 12 patentes.

Miembro de la Sociedad Magnética de Rusia, y miembro de la junta directiva de la Asociación de Ingenieros Electrónicos de Potencia de Rusia.

Héctor Cadavid R.

M.Sc. Instituto Superior Energético de Moscú, 1985. Ingeniero de mantenimiento de ABOCOL - AMOCAR, 1985 - 1987.

Profesor de tiempo completo del Departamento de Electricidad, Facultad de Ingeniería Universidad del Valle desde 1987.

Jefe de Laboratorio Alta Tensión. Universidad del Valle. 1988 a 1992

Jefe del Departamento de Electricidad. Universidad del Valle. Desde 1992.

BIBLIOGRAFIA

1. PUZIKOV, V. M.; SITNIKOV, V. F. *Modern Power Electronic Apparatus Using Fast Responce Magnetic Components*. Moscow, Informelectro, 1989.
2. SAVANI, A. *Modelling Hysteresis Loops for Finite Element Magnetic Field Calculations*. IEEE Transactions on Magnetics, 1982, V. 18, N. 2.
3. KHRUSLOV, L. L.; SITNIKOV, V. F. *Magnetization Processes Analysis in Single Wounded Magnetic Amplifier Concerning the Dynamic Hysteresis Effects*. Electromechanic, 1988, N. 11.
4. SAKAKY, Y.; IMAGI, S. I. *Relationship Among Eddy Current Loss, Frequency, Maximum Flux Density and a New Parameter Concerning the Number of Domain Walls in Polycrystalline and Amorphous Soft Magnetic Materials*. IEEE Transactions on Magnetics, 1981, V. 17, N. 4.
5. PREISACH, F. *Über die Magnetische Nachwirkung*. Zeitschrift für Physik, 1935, V. 94, N. 5-6.

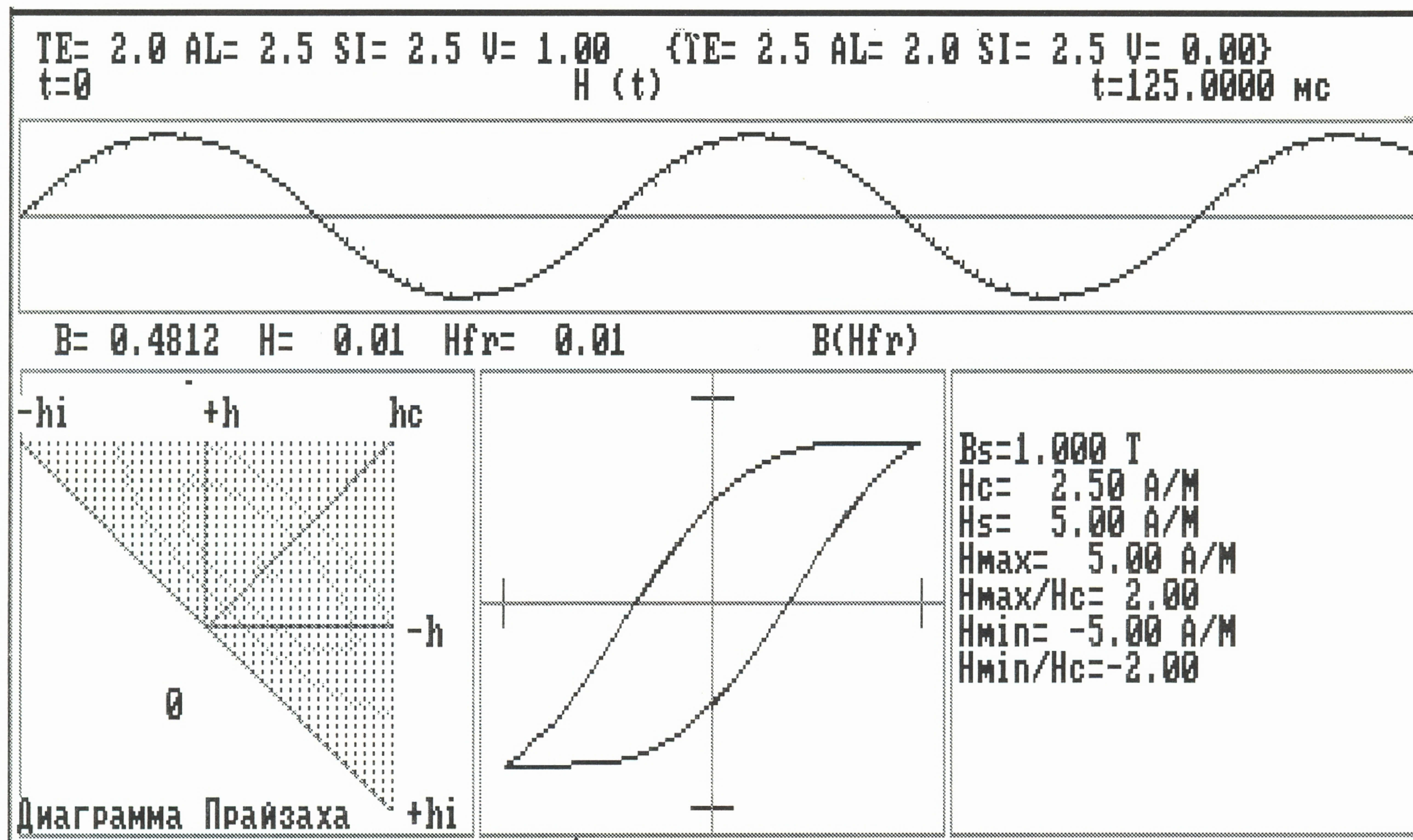


Figura 2. Curva de Histéresis y Diagrama de Preisach por la fuente sinusoidal

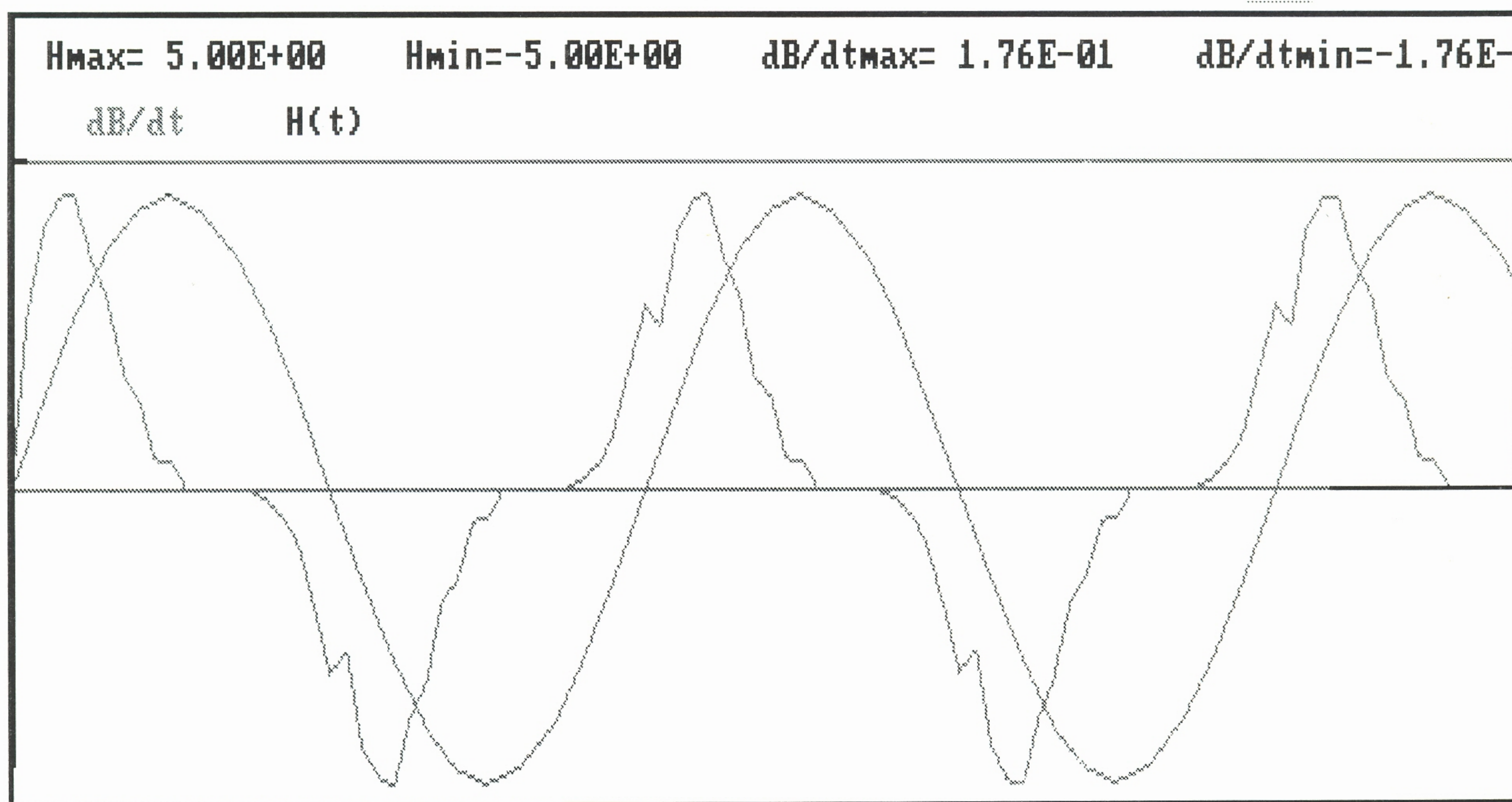


Figura 3. Característica dinámica

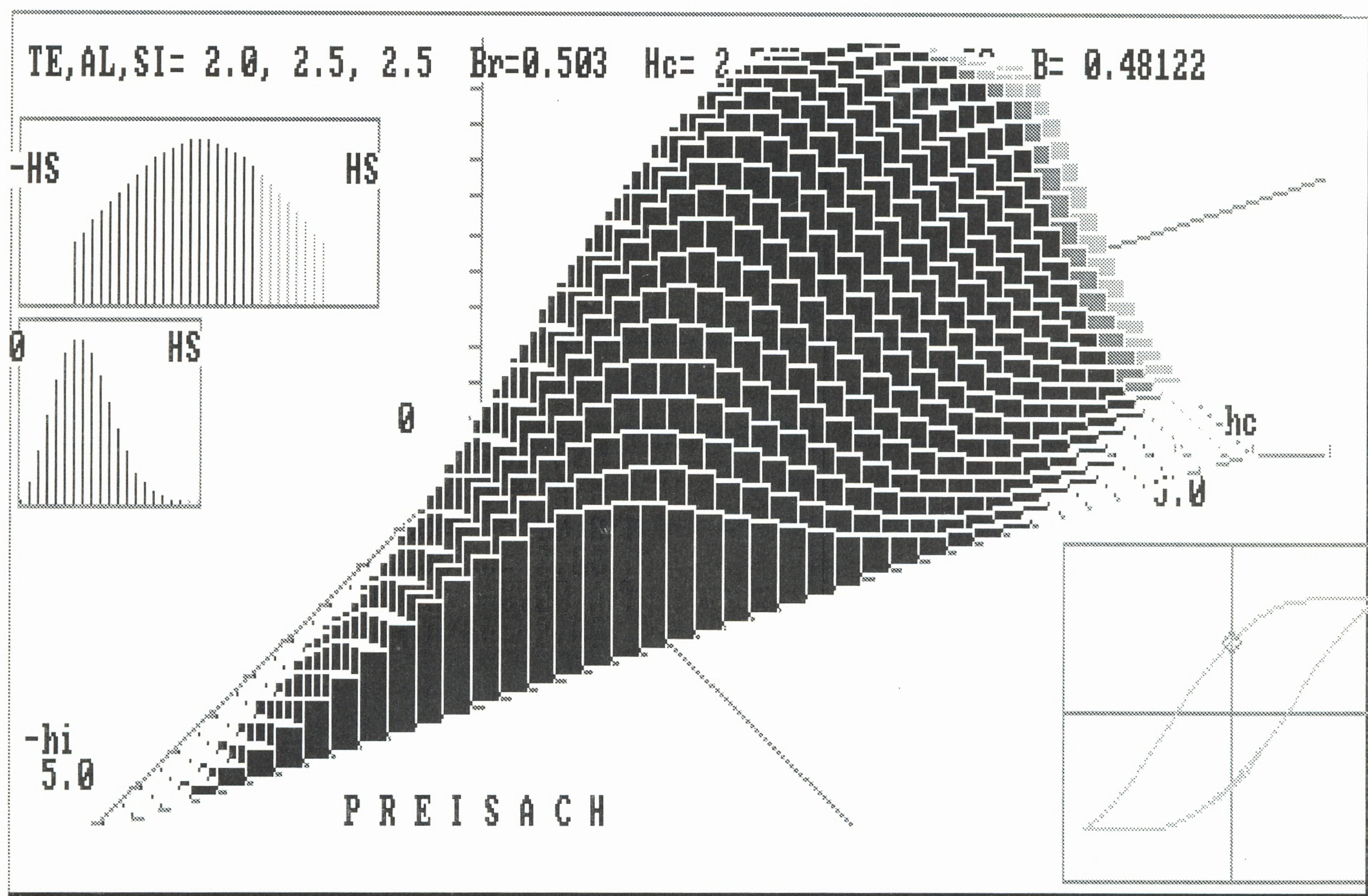


Figura 4. Diagrama de Preisach en tres coordenadas

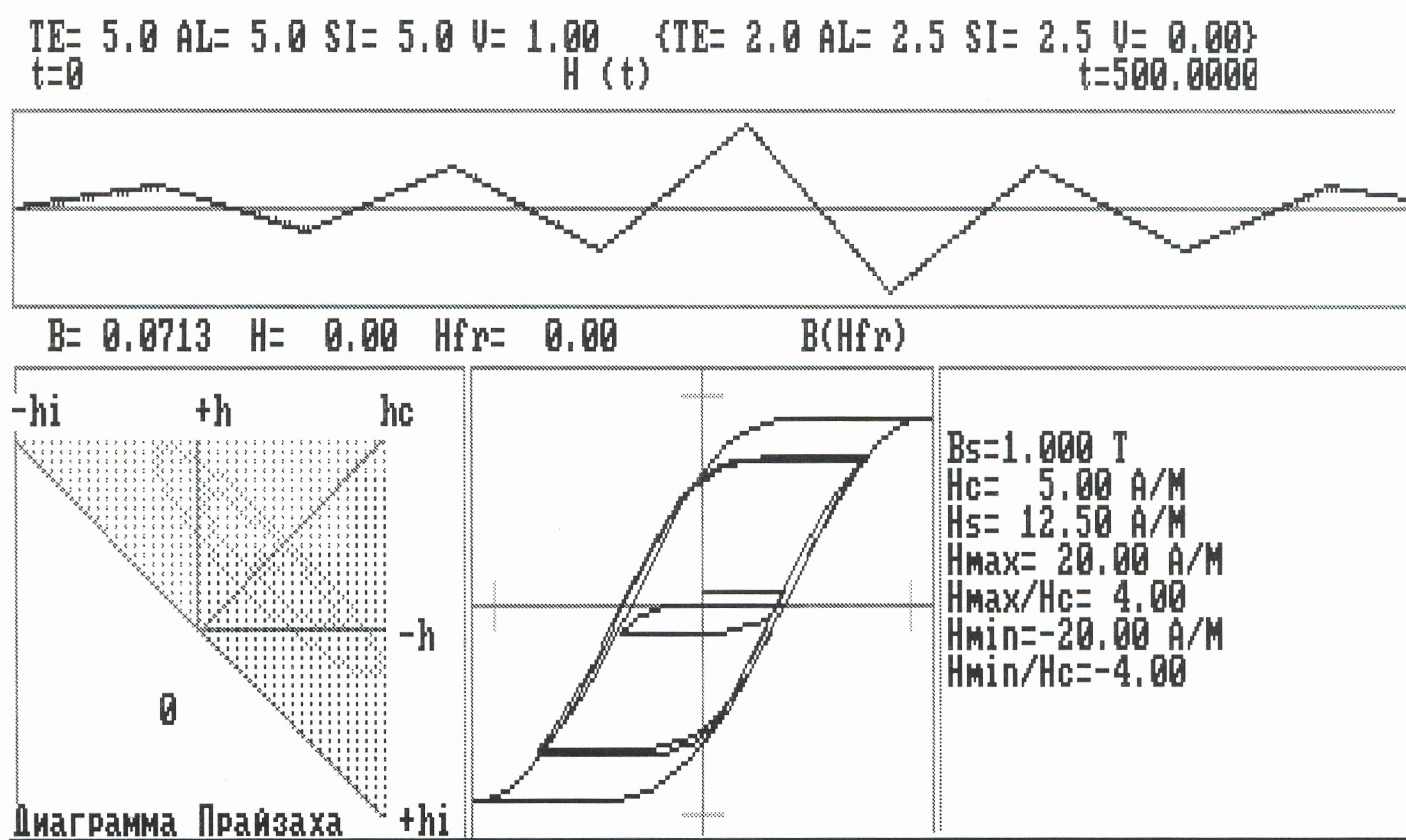


Figura 5. Curva de Histéresis y Diagrama de Preisach para una fuente triangular.

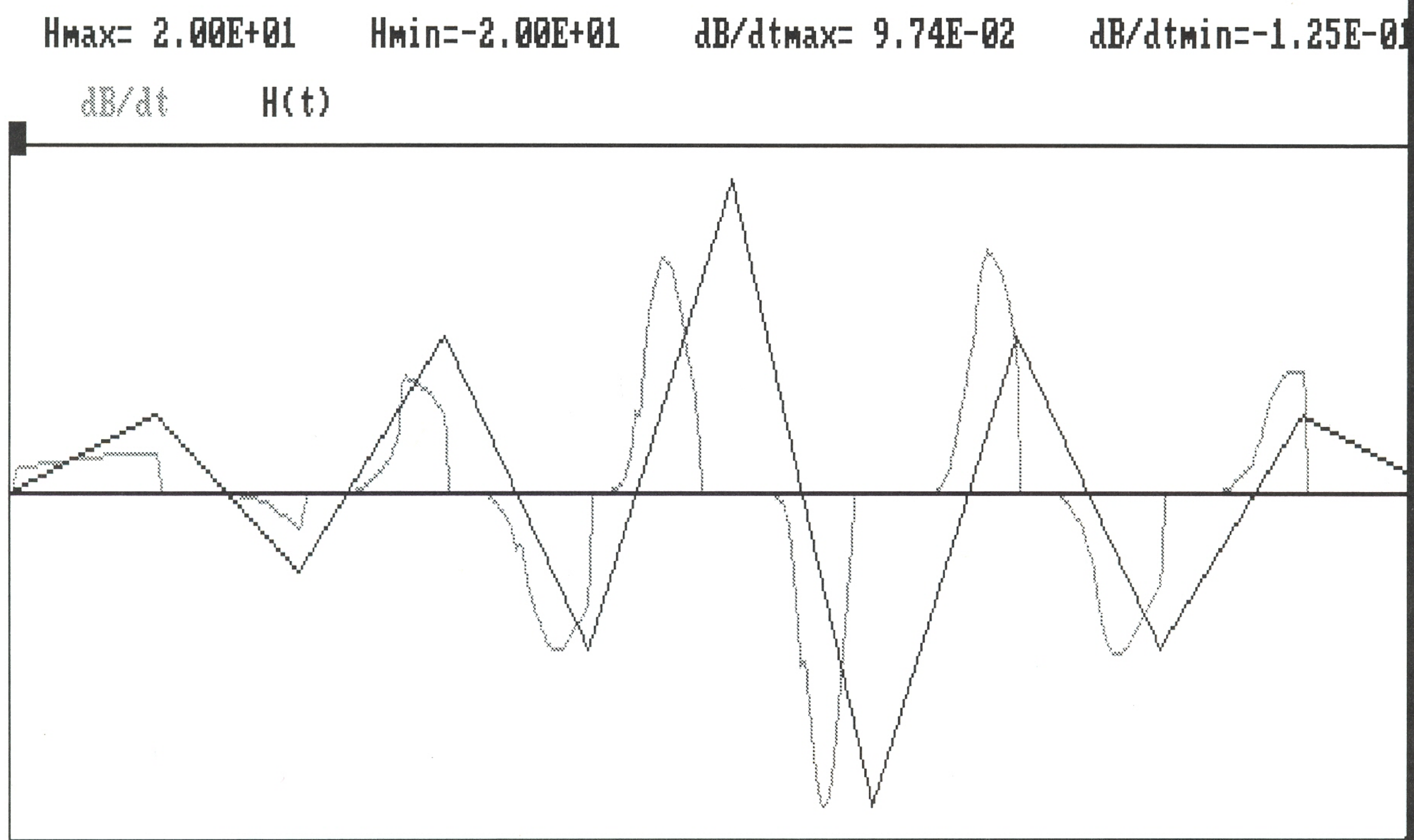


Figura 6. Característica dinámica.

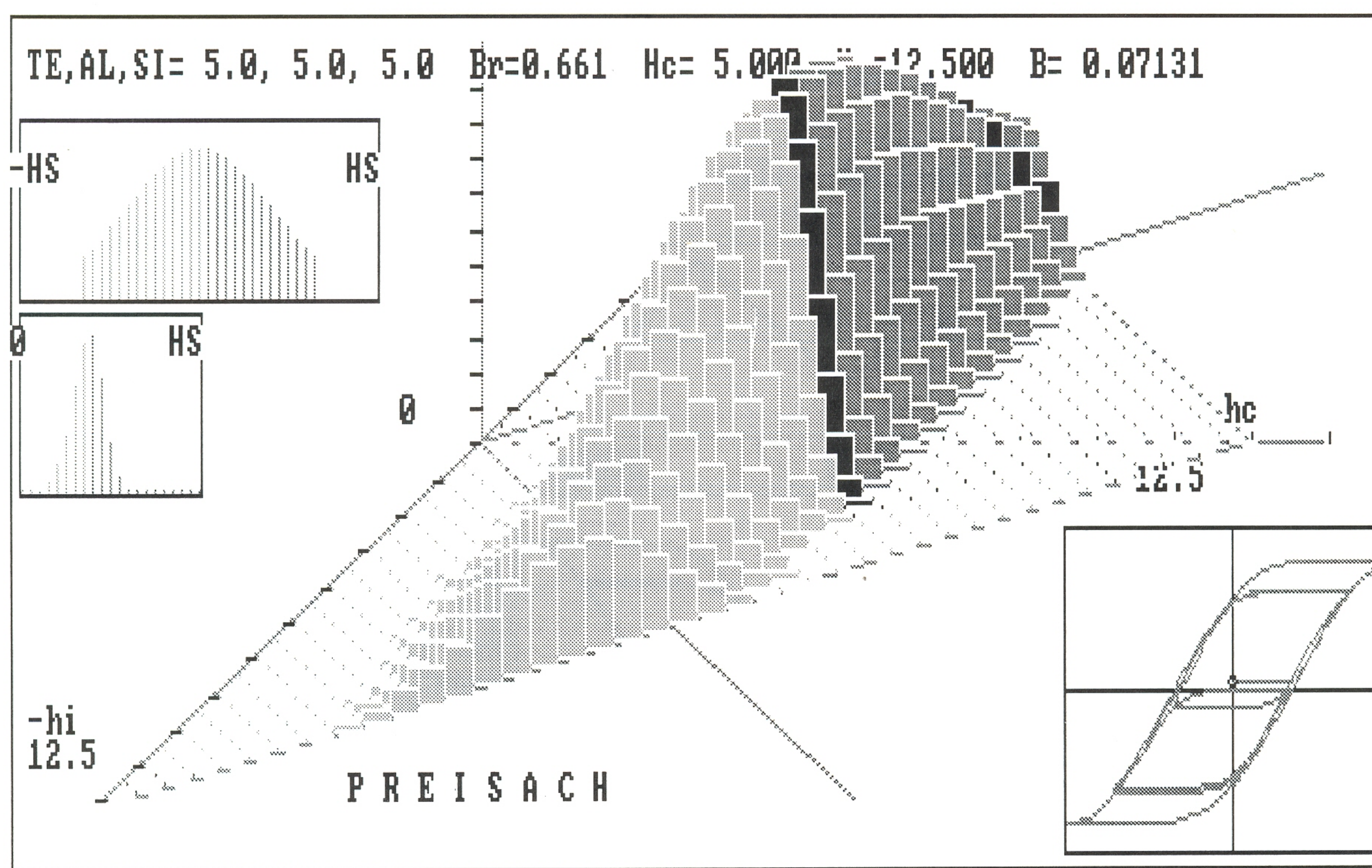


Figura 7. Diagrama de Preisach en tres coordenadas.