



## MAXIMIZACIÓN DE LA PERMEABILIDAD MAGNÉTICA DE BARRAS DE NUMETAL ( $\text{Ni}_{77}\text{Fe}_{14}\text{Cu}_5\text{Mo}_4$ ) PARA USO EN TECNOLOGÍA SATELITAL

Gabriel Ferrero S. \*, Gustavo Henríquez C., Percy Paz R., Juan Tumialán L., Ida Ayarza C.  
*Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) Luis F. Villarán 1069, San Isidro, Lima 27*

### Abstract

An experimental procedure has been developed to increase in a factor of 50 the magnetic permeability of mumetal bars ( $\text{Ni}_{77}\text{Fe}_{14}\text{Cu}_5\text{Mo}_4$ ). The procedure consists of a heat treatment under inert atmosphere, for which a programmable automatic temperature regulator of high precision was designed and constructed.

It has been verified that during the treatments the system is able to maintain a stable temperature of more than 1000 °C with an error smaller than 2 °C and with smaller linear gradients of 1%.

In addition permeameter with electronic airflow meter was designed and constructed for monitoring the magnetic permeability.

The treated bar was used to construct a magnetic pair (magnetic torquex) for satellite. The produced instrument develops a maximum magnetic dipole of 25 Am<sup>2</sup> in its linear zone with a consumption of less than 0,3 W of power and one mass of 2,1 kg

Taking advantage of the interaction between the magnetic pairs and the Earth's magnetic field is possible to introduce torque in a satellite in orbit for controlling its direction in the space.

*PACS:* 07.55.-w; 85.75.Ss; 91.25.-r

*Keywords:* Magnetic permeability, magnetic pairs, magnetic field

### Resumen

Se ha desarrollado un procedimiento experimental capaz de aumentar en un factor de 50 la permeabilidad magnética de barras de mumetal ( $\text{Ni}_{77}\text{Fe}_{14}\text{Cu}_5\text{Mo}_4$ ). El procedimiento consiste en un tratamiento térmico bajo atmósfera inerte, para el cual se diseñó y construyó un control automático de temperatura programable de alta precisión.

En el curso de los tratamientos se ha verificado que el sistema es capaz de mantener una temperatura estable de más de 1000 °C con un error menor que 2 °C y con gradientes lineales menores del 1%.

Además se diseñó y construyó un permeámetro con fluxómetro electrónico con el cual se verificó la permeabilidad magnética alcanzada.

La barra tratada se utilizó para construir un magnetopar (magnetic torquer) para satélite. El instrumento producido desarrolla un momento dipolar magnético máximo de 25 Am<sup>2</sup> en su zona lineal con un consumo de menos de 0.3 W de potencia y una masa de 2.1 kg.

Aprovechando la interacción de los magnetopares con el campo magnético terrestre, es posible introducir un torque en un satélite en órbita y de esta manera controlar su orientación en el espacio.

*Palabras claves:* Permeabilidad magnética, magnetopares, campo magnético

### 1. Introducción

Entre los años 1996 y 2002 la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial del Perú (CONIDA) llevó a cabo una serie de estudios sobre tecnología satelital denominados Proyecto

Minisatélites. Como parte de dichos estudios, se desarrollaron modelos de ingeniería de varios dispositivos de uso satelital, entre los cuales un magnetopar.

Los magnetopares forman parte del sub-sistema actitud de un satélite [7]. La finalidad de dicho sub-

\* Corresponding author. e-mail: [gferrero@conida.gob.pe](mailto:gferrero@conida.gob.pe)

sistema es mantener controlada la posición y la orientación del satélite de acuerdo a los requerimientos de la misión y de los restantes sub-sistemas. Para cumplir esta tarea, el sub-sistema actúa con varios sensores y actuadores o sea, dispositivos capaces de cambiar la posición y/o la orientación del satélite. Los magnetopares son actuadores que inciden sobre la orientación del satélite.

El magnetopar consiste en una bobina con un elevado número de vueltas enrollada sobre un núcleo de material ferromagnético blando, con la cual puede generar un momento dipolar magnético variable, que al interactuar con el campo magnético terrestre introduce un torque sobre la estructura del satélite.

En virtud de las habituales restricciones que se imponen a todos los diseños de dispositivos satelitales (mínima masa, mínima potencia, máximo rendimiento), en el caso de los magnetopares resultan críticas las propiedades magnéticas del núcleo de la bobina, y especialmente su permeabilidad magnética<sup>†</sup> máxima.

El material seleccionado para el núcleo de la bobina fue una barra de Mumetal [3,6,9] de 12 mm de diámetro y 500 mm de longitud (composición nominal  $Ni_{77}Fe_{14}Cu_3Mo_4$ ) cuya permeabilidad magnética al momento de la fabricación es insuficiente para los requerimientos establecidos.

## 2. Sistema de Control de Temperatura

El tratamiento térmico requerido depende críticamente de un preciso sistema de control de temperatura. Con esta finalidad se desarrolló un sistema de control de temperatura automático retroalimentado, implementado específicamente para el horno eléctrico utilizado, con control independiente para cada resistencia calentadora [2].

Todos los componentes electrónicos del sistema, así como las termocuplas, fueron diseñadas y construidas en Conida. El algoritmo de control empleado fue la versión digitalizada del PID analógico [8,10].

La diferencia máxima entre la temperatura medida y la programada a 1200 °C fue de 2 °C. Durante las fases de calentamiento y estabilización de la temperatura se lograron gradientes menores que 0.2 °C/cm en estado estacionario a 1120 °C. Durante la fase de enfriamiento, la temperatura de referencia fue generada en forma inteligente por el software, consiguiéndose así que el gradiente de temperatura promedio fuera 0.3 °C/cm con una velocidad de enfriamiento media de 0.3 °C/min [4].

<sup>†</sup> En este trabajo nos referimos siempre a la permeabilidad relativa dc [1].

## 3. Tratamiento Térmico de las Barras de Mumetal

Los mejores resultados se obtuvieron en un tratamiento térmico realizado bajo las siguientes condiciones [4]:

Atmósfera: Argón a 1.3 atm (velocidad de renovación aproximada = 3 cm<sup>3</sup>/s)

Temperatura inicial T = 19 °C

Velocidad de calentamiento para T < 660 °C = 10 °C/min

Velocidad de calentamiento para 660 °C < T < 960 °C = 6 °C/min

Velocidad de calentamiento para 960 °C < T < 1120 °C = 3 °C/min

Tiempo de estabilización a 1120 °C = 4 horas

Fase de enfriamiento:

Velocidad promedio = 0.3 °C/min

Velocidad máxima = 6.0 °C/min

Velocidad promedio entre 400 y 350 °C = 0.2 °C/min

Velocidad máxima entre 400 y 350 °C = 1.4 °C/min

Gradiente promedio = 0.32 °C/cm

Gradiente máximo = 1.4 °C/cm. a 207 °C

Gradiente promedio entre 400 y 350 °C = 0.31 °C/cm

Gradiente máximo entre 400 y 350 °C = 0.68 °C/cm a 354 °C

Temperatura final T = 200 °C

Duración total del proceso = 54 h 59 m

## 4. Medición de la Permeabilidad Magnética

La permeabilidad magnética se midió utilizando un permeámetro diseñado y construido en Conida.

Este consiste básicamente en un circuito magnético cerrado formado por tres ramas paralelas. En la primera de ellas se aplica un campo magnético externo, el cual se divide luego entre la rama central y la secundaria. La rama central está formada por el espécimen en estudio y el resto del circuito por un material ferromagnético común (hierro silicoso). Sendas bobinas sensoras conectadas a integradores electrónicos permiten medir el flujo magnético a través de las ramas central y secundaria [1].

La permeabilidad relativa máxima alcanzada en las barras tratadas en Conida es del orden de 50000, con una ligera tendencia hacia valores superiores a los de una barra idéntica tratada por la empresa Goodfellow.

Cabe la posibilidad de que nuestro procedimiento de medida contenga aún errores sistemáticos importantes que no hayan sido tomados en cuenta, como por ejemplo una fuga de flujo magnético. Sin embargo, los valores de permeabilidad obtenidos son consistentes con las mediciones posteriores del campo generado por el magnetopar, lo cual nos induce a pensar que son fundamentalmente correctos.

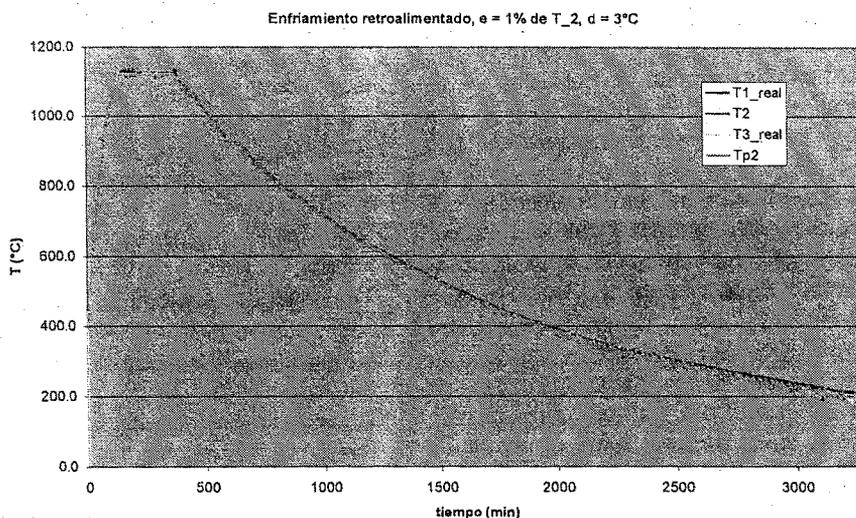


Fig. 1. Evolución de la temperatura durante el tratamiento térmico.

## 5. Características de las Bobinas del Magnetopar

El diseño final del prototipo de magnetopar contempló la obtención del máximo momento dipolar magnético posible con la mínima masa y mínima potencia disipada. Esto se logró utilizando un enrollamiento bifilar de bobinas en 12 capas de alambre de cobre AWG24 doble esmalte con un total de 5040 vueltas por hilo.

## 6. Medición del Momento Dipolar Magnético

El momento dipolar magnético se midió indirectamente a través de mediciones del campo magnético generado por las bobinas a distancias variables sobre su eje longitudinal. Como las distancias eran pequeñas (campo cercano [11]), el paso a la aproximación dipolar se realizó por medio de funciones correctoras obtenidas a partir de un modelo analítico de las bobinas [4].

Las mediciones se realizaron utilizando un magnetómetro tipo fluxgate y la influencia del campo geomagnético se eliminó mediante mediciones sucesivas con corriente invertida en las bobinas. De este modo se encontró que en la zona lineal el momento magnético  $m$  (medido en Am<sup>2</sup>) se relaciona con el voltaje aplicado  $V$  (en Voltios) según la ecuación  $\mu = 9.1V + 0.7$  para  $0.0 < V < 2.7$  V, con un error estándar de 0.4 Am<sup>2</sup>. El momento máximo en la zona lineal resulta de 25.0 Am<sup>2</sup>, y el momento de saturación 31.6 Am<sup>2</sup> para un voltaje de 10.4 V. La potencia máxima disipada en el máximo de la zona lineal fue 0.29 W [5].

## 7. Conclusiones

Se realizó un tratamiento térmico adecuado para aumentar la permeabilidad magnética de barras de Mumetal llevándola al nivel necesario para su uso en magnetopares para satélites. Esto incluyó el desarrollo, diseño e implementación de un sistema de control de temperatura y de un permeámetro.

Se diseñó y construyó un prototipo de magnetopar para satélite que disipa menos potencia que equipos similares con el mismo momento dipolar [4].

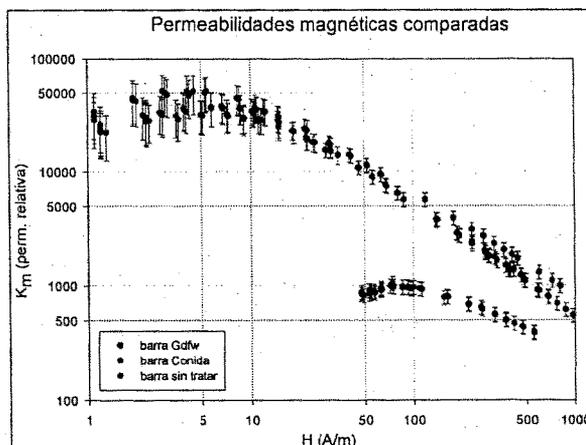


Fig. 2. Permeabilidad magnética relativa en función del campo excitante. Los puntos rojos corresponden a una barra producida y tratada por Goodfellow Cambridge Ltd.

## 8. Agradecimientos

Nuestro agradecimiento en primer lugar al personal técnico del Proyecto Minisatélites, en especial a César Cahuana y Martín Cárdenas y a los profesionales que trabajaron en esta Meta desde el inicio del Proyecto, entre los cuales debemos mencionar especialmente a Roberto Campos, Juan Carlos González González y Edward Marin.

## Referencias

- [1] Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Direct Current Magnetic Properties of Materials Using D-C Permeameters and the Ballistic Test Methods", Vol. 03-04, A341/A341M-95, 2000
- [2] H. Burga, Proy. Minisatélites – "Adquisición y Control de Temperatura de un Horno Eléctrico", CONIDA. 2001.
- [3] G. Couderchon, J. F. Tiers, *J. Magnetism and Magnetic Materials*, **26** 196-213 (1982)
- [4] G. Ferrero, P. Paz, J. Tumialán, I. Ayarza, V. Baltazar, *Proy. Minisatélites–Meta Magnetopar –Producto Final y sus Especificaciones*, CONIDA. 2002.
- [5] G. Ferrero, P. Paz, J. Tumialán, I. Ayarza, *Proy. Minisatélites–Meta Magnetopar–Informe Final*, CO1-SE-ACT-02-00-000, CONIDA. 2002.
- [6] F. Fiorillo, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials Part 1*, **242-245** 77-83 (2002).
- [7] W. J. Larson, J. R. Wertz, "Space Mission Analysis and Design, Microcosm" Inc. & Kluwer Academic Pub., Norwell MA, 1996.
- [8] R. Marino, P. Tomei, "Nonlinear Control Design", Prentice Hall, 1995.
- [9] F. Pfeifer, C. Radeloff, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **19** 190-207 (1980).
- [10] J. J. Slotine, W. Li, "Applied Nonlinear Control", Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [11] J. C. Boyle, J. Greyerbiehl, E. J. Mosher, "A Theoretical Approach to the Determination of Magnetic Torques by Near Field Measurement", NASA, CFSTI, Springfield, Virginia, 1968.