

Principio de Funcionamiento del Magnetómetro y el Magneto-Torquer y sus aplicaciones en la tecnología espacial.

Kevin Khalil*, Frednides Guillén y Eliécer Hernández

División de Propulsión

Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación Espacial

Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales

Borburata, Estado Carabobo, Venezuela

kevinn.khalils@gmail.com, frednides@yahoo.es &
ehernandez@abae.gob.ve

Resumen - En este artículo se presenta el principio de funcionamiento del magnetómetro, los diferentes tipos y su aplicación en la tecnología espacial como instrumento de medida para determinar la posición y orientación de un satélite. Así mismo se presenta el principio de funcionamiento del magneto-torquer, el cual es un actuador conformado básicamente por bobinas electromagnéticas, empleado fundamentalmente para la estabilización y el control de orientación del satélite.

Términos clave – Campo magnético, magnetómetro, Magneto-torquer.

I. INTRODUCCIÓN

El planeta tierra genera un campo magnético que se extiende desde su núcleo hasta el límite en donde se encuentra con el viento solar; la magnitud de este campo puede variar considerablemente desde un punto a otro, lo cual puede ser causado por las diferentes naturalezas de las rocas y la interacción entre las partículas cargadas del sol y la magnetósfera de la tierra. Desde hace muchos años, se ha descubierto la manera de aprovechar este fenómeno natural tanto para medir como para controlar la orientación del satélite mediante el uso de dispositivos denominados magnetómetros y magneto-torquers. El Magnetómetro es un instrumento científico que mide este fenómeno en términos de densidad de flujo magnético, además este mide la cantidad de perturbación producida entre materiales magnéticos y el campo magnético de la tierra, midiendo así la fuerza de los campos magnéticos; la información obtenida puede utilizarse para determinar la dirección, la rotación y el ángulo de los campos magnéticos, así como la ubicación de objetos específicos dentro de ellos. Adicionalmente, se describe el principio de funcionamiento del magneto-torquer el cual tiene como función principal generar un campo magnético que interactúe con el campo magnético de la tierra (efecto similar a la tendencia que tiene una aguja imantada a alinearse con las líneas de campo magnético de la tierra), proporcionando así un torque magnético que se emplea para el control de orientación de satélites.

El resto de éste artículo está estructurado de la siguiente manera: En la sección II se define el magnetómetro, sus tipos y clasificación. La sección III, describe el magnetómetro y sus aplicaciones. En la sección IV se muestra el concepto y

funcionamiento del magneto-torquer. La sección V se proporciona el modelo matemático del magneto-torquer. En la sección VI se desarrolla un ejercicio práctico relacionado al cálculo del campo magnético actuante sobre un satélite en una órbita dada. Y la sección final sintetiza las conclusiones de la investigación.

II. MAGNETÓMETRO: TIPOS Y CLASIFICACIÓN

El magnetómetro es un instrumento que mide fundamentalmente la intensidad del campo magnético local, y dependiendo del tipo de magnetómetro se puede obtener además la dirección de dicho campo magnético.

El primer magnetómetro fue inventado en 1833 por Carl Friedrich Gauss y durante el siglo XIX, notables desarrolladores incluyeron el Efecto Hall como forma de medida de campos magnéticos, el cual se utiliza ampliamente en la actualidad [4]. Los magnetómetros se utilizan mayoritariamente para la medición del campo magnético terrestre y en estudios geofísicos para detectar anomalías magnéticas de diferentes tipos. En la actualidad más reciente, los magnetómetros han sido miniaturizados, con el objetivo de ser incorporados en circuitos integrados a muy bajo costo, pudiéndose emplear en dispositivos electrónicos como celulares móviles o tabletas, con el cual se pueden ejecutar aplicaciones como la brújula, mapas, entre otros.

Los magnetómetros pueden ser divididos en dos tipos básicos:

1. Magnetómetros escalares: Estos miden la intensidad total del campo magnético resultante al que están sometidos, pero no aporta ningún dato sobre las componentes vectoriales de campo.
2. Magnetómetros vectoriales: Estos tienen la capacidad de medir la intensidad del campo magnético en una dirección particular, dependiendo de la colocación que le demos al dispositivo.

Los magnetómetros escalares se clasifican en:

- Magnetómetro de Precesión de Protón
- Magnetómetros de Efecto Overhauser
- Magnetómetro de Vapor Cesio

Los magnetómetros vectoriales se clasifican en:

- Magnetómetro de Bobina Rotativa
- Magnetómetros de Hall Effect
- Magnetómetros Magneto-resistentes
- Magnetómetros Fluxgate
- Magnetómetro SQUID
- Magnetómetros atómicos SERF

III. MAGNETÓMETRO Y SUS APLICACIONES

El magnetómetro también tiene un amplio uso en aplicaciones espaciales, en especial para misiones científicas, ya que es un instrumento robusto pero con una precisión limitada alrededor de $0,5^\circ$. El magnetómetro también es utilizado para la percepción y/o determinación de orientación, sin embargo se presenta la problemática que el campo magnético terrestre no está bien mapeado y tiene anomalías, haciendo que el uso del sensor (magnetómetro) sea limitado como instrumento de percepción de orientación, ya que para obtener la información de la orientación de un vehículo espacial, el campo magnético medido se compara con un modelo de campo magnético terrestre almacenado en un procesador a bordo. El magnetómetro también es utilizado en conjunto con magneto-torquers, los cuales funcionan como actuadores. [2, pag. 318].

En algunas misiones espaciales científicas, el magnetómetro está montado sobre una estructura radial (radial boom) a una distancia mínima de 5,6m del el cuerpo de la nave espacial tal como se muestra en la figura 1, para minimizar las interferencias que afectan la compatibilidad electromagnética [2, pag. 531]. Ya que los campos magnéticos DC son fijos y usualmente se miden en pico-teslas (pT); estos no varían con el tiempo y son producidas por magnetos o imanes permanentes o por corrientes DC fluyendo en cualquier circuito, sus magnitudes son importantes y deben ser minimizadas en misiones espaciales científicas que utilizan magnetómetros para medir campos magnéticos ambientales.

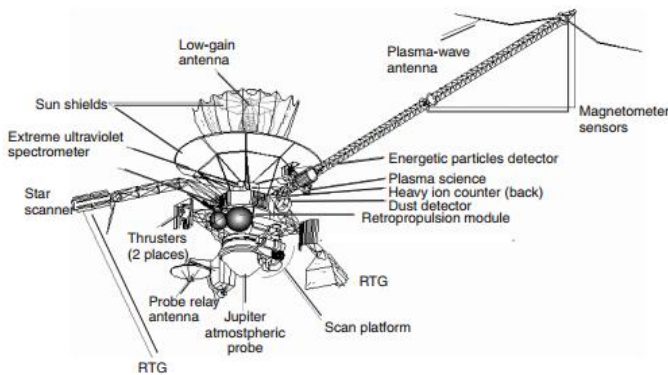


Figura 1: Configuración de la nave espacial Galileo [2]

Es imposible construir naves espaciales que no tengan algún nivel de campo magnético DC y si se requieren mediciones sensibles, los magnetómetros están generalmente

ubicados sobre una estructura radial a unos metros de distancia lejos del cuerpo de la nave espacial. Los campos magnéticos DC pueden ser reducidos: 1) minimizando el uso de materiales ferromagnéticos o permeables, 2) y reduciendo las corrientes DC y minimizando el lazo del área alrededor del cual están fluyen. [2, pag. 533]

El magnetómetro es un instrumento ampliamente utilizado como un sensor para la determinación de orientación de naves espaciales por varias de razones: estos son sensores de vector y proveen la dirección y magnitud del campo magnético, estos son confiables, de bajo peso, y tienen poco requerimiento de consumo de energía; estos operan en un amplio rango de temperatura y no tienen partes móviles. Sin embargo, los magnetómetros no son sensores de orientación inercial precisos ya que el campo magnético no es completamente conocido y los modelos utilizados para predecir la dirección y magnitud del campo magnético en la posición de la nave espacial están sujetos relativamente a errores sustanciales. Además, la fuerza del campo magnético de la tierra decrece con la distancia desde de la tierra en una relación $1/r^3$, el campo magnético residual de la nave espacial eventualmente domina la medición del campo magnético total, generalmente limitando el uso de los magnetómetros para naves espaciales que orbitan por debajo de 1000 km; sin embargo, los magnetómetros para la estimación de orientación funcionaron exitosamente en la misión RAE-1 (The Radio Astronomy Explorer Satellite, launched at 1968) en una altitud de 5875 km.

Como se ilustra en la Figura 2, el magnetómetro consiste en dos partes: un sensor magnético y una unidad electrónica que transforma la medida del sensor en un formato utilizable. EL sensor de campo magnético está dividido en dos categorías principales: magnetómetros cuánticos, los cuales utiliza propiedades atómicas fundamentales tales como el efecto Zeeman o la resonancia magnética nuclear y los magnetómetros de inducción, los cuales están basados en la Ley Faraday de inductancia magnética. [3, pag. 180-181]

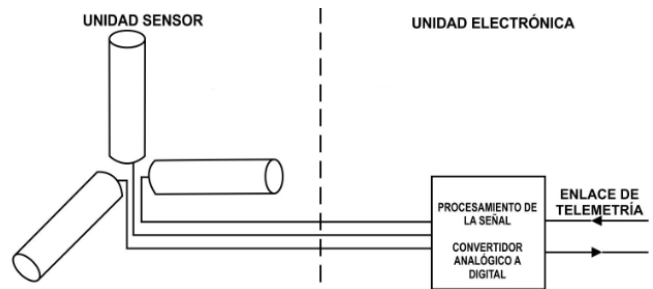


Figura 2: Diagrama de bloque generalizado del magnetómetro [3]

IV. MAGNETO – TORQUERS

El magneto-torquer es un dispositivo de control activo, el cual consiste en un cable arrollado sobre un núcleo ferromagnético, energizado con una corriente eléctrica controlada por una computadora. Su función principal es producir un campo magnético que interactúa con el campo magnético de la tierra, y producir un torque que hace girar al satélite en la dirección necesaria para mantenerlo apuntando siempre hacia la tierra con la tolerancia requerida. Este tipo de dispositivo proporciona disponibilidad de un rango de intensidad para satisfacer los requerimientos de la misión y puede ser utilizado en modo de control proporcional o de encendido-apagado, para control de orientación o para descarga de momento.



Figura 3: Magneto-torquer

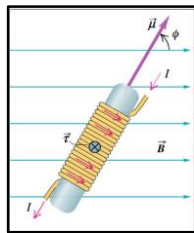


Figura 4: Composición del magneto-torquer

Tres imanes dispuestos de manera ortogonal, hacen posible el control de la dirección y la magnitud del dipolo. La ubicación de estos actuadores dentro del satélite debe ser lejana a los instrumentos sensibles a campos magnéticos. Los imanes deben estar separados uno del otro para evitar el acoplamiento magnético.

El uso de los magneto-torquers es frecuente en los satélites que orbitan a diferentes altitudes, inclusive hasta en órbita geoestacionaria, sin embargo, su utilidad decrece a medida que aumenta la altitud, puesto que la intensidad del campo magnético de la tierra se reduce con la altura. La intensidad y dirección del campo también varía con la posición del satélite dentro de la órbita, por esta razón, cuando se utilizan magneto-torquers, normalmente se involucra el uso de magnetómetros para tener un conocimiento más preciso de estos factores.

Una característica desfavorable de los magneto-torquers es que no pueden producir una componente de torque en la dirección del campo local. Sin embargo, estos dispositivos ofrecen numerosas ventajas, como por ejemplo el hecho de no requerir combustible para su funcionamiento, por lo tanto, en

teoría tienen vida útil ilimitada (aunque si requieren de un suministro de energía eléctrica para operar). Otra de las ventajas de este actuador, es que al proporcionar un par de fuerzas sobre el cuerpo del satélite, no es necesario considerar el cambio de posición del centro de masa.

V. MODELO MATEMÁTICO DEL MAGNETO-TORQUER

El Torque de cualquier campo magnético sobre una bobina electrificada, puede expresarse de la siguiente manera:

$$T = N * I * A * B * \text{sen}(\theta) \quad (1)$$

Donde:

T= torque magnético (N*m).

N = número de vueltas en la bobina.

I = corriente de la bobina (Amp)

A = área de la bobina (m²)

B = campo magnético de la tierra. (Tesla o Gauss. 1 G = 1x10⁻⁴Tesla)

θ = ángulo entre las líneas de campo magnético y el eje perpendicular a la bobina).

Se entiende por campo magnético residual de un satélite, el resultado de la corriente de las espiras y el magnetismo residual de las partes mecánicas. Éste puede ser expresado por el siguiente producto:

$$M = N * I * A \quad (2)$$

Por lo tanto, la ecuación (1) puede expresarse de la forma:

$$T = M * B * \text{sen}(\theta) \quad (3)$$

Un valor preciso del dipolo residual de un satélite debe obtenerse mediante pruebas. Sin embargo dicho valor oscila normalmente entre 0,2 amp * m², y 20 amp * m², dependiendo del tamaño del satélite.

Otro factor importante a considerar es el hecho de que el campo magnético de la tierra se encuentra inclinado 11° con respecto al eje rotacional de la misma, y está centrado alrededor de 400Km de su centro geográfico. Por lo tanto, sus efectos serán más notorios en diferentes lugares, puesto que éste es mayor en los puntos de convergencia que en los puntos de divergencia de las líneas del campo magnético.

La variación de la fuerza del campo magnético de la tierra, es inversamente proporcional al radio de la órbita elevado al cubo, por ende, mientras mayor sea la altitud de la órbita, menores serán las perturbaciones causadas por el campo magnético.

La intensidad de campo magnético de la tierra en una órbita a cualquier altitud puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$B = \frac{B_0 * r_0}{r^3} * (3 \text{sen}^2(L) + 1)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Donde:

B : Intensidad del campo magnético de la tierra en cualquier altitud o latitud.

B_0 : Intensidad del campo magnético de la tierra a nivel del mar (aproximadamente 3×10^{-5} Tesla)

r : radio orbital del satélite (m)

r_0 : Radio de la tierra (6378000 m)

L : Latitud en la magnetosfera ($^\circ$) – La latitud geográfica solo aplica para cálculos aproximados.

Partiendo de la ecuación 4, se demuestra que la intensidad del campo magnético de la tierra en los polos es el doble que en el ecuador.

En la tabla 1 se muestra la intensidad de campo magnético de los planetas en un radio dado. Es de hacer notar, que la intensidad de campo magnético de Venus y Marte es despreciable.

Tabla 1: Intensidad de campo magnético a un radio dado

Planeta	Intensidad de campo magnético (T)	Radio (km)
Mercurio	$3,5 \times 10^{-7}$	2.440
Venus	$< 3 \times 10^{-8}$	6.051
Tierra	$3,1 \times 10^{-5}$	6.378
Marte	5×10^{-8}	3.397
Júpiter	$4,3 \times 10^{-4}$	71.372
Saturno	$2,1 \times 10^{-5}$	60.330
Urano	$2,28 \times 10^{-5}$	25.600
Neptuno	$1,33 \times 10^{-5}$	24.765
Plutón	$\zeta?$	2.500

VI. EJERCICIO PRÁCTICO

Considerando un satélite con un dipolo residual de $2 A * m^2$ en una órbita ecuatorial circular, a una altitud de 400km. Se desea conocer la magnitud del momento magnético del satélite.

- Calculando el radio de la órbita:
 $r = (400 + 6378) * (10^3) = 6.778.000m$

- Partiendo de la ecuación (4), se obtiene el campo magnético de la tierra en una órbita ecuatorial de 400km:

$$B = \left(\frac{6378000}{6778000} \right)^3 * 3 \times 10^{-5} * (1)^2$$

$$B = 2,5 \times 10^{-5} \text{ Tesla}$$

- Finalmente, de la ecuación (3) se obtiene la magnitud del campo magnético actuante sobre el satélite:
 $T = (2,5 \times 10^{-5} T) * (2 A * m^2)$

Obteniendo:

$$T = 5 \times 10^{-5} N * m$$

VII. CONCLUSIONES

El magnetómetro es un instrumento que mide fundamentalmente la intensidad del campo magnético local y dependiendo de su principio de funcionamiento este puede arrojar la información dirección de dicho campo. Los magneto-torquers son utilizados ampliamente en la actualidad puesto que a pesar de no realizar maniobras tan eficientes como el de los thrusters, tienen las ventajas de no requerir combustible para su funcionamiento, ni poseer partes móviles, las cuales son características muy valiosas en el ámbito satelital.

El momento magnético que puede proporcionar el magneto-torquer es mucho mayor cuando se implementa en misiones espaciales de órbita baja, puesto que los efectos del campo magnético de la tierra son inversamente proporcionales a la altitud de la órbita. De igual manera, cuando se emplean magnetómetros como sensores de determinación de la orientación de un vehículo espacial, la precisión de los resultados se ve afectada por la altitud, debido a que estos operan bajo el mismo principio de funcionamiento que los magneto-torquers.

VIII. REFERENCIAS

- [1] C. D. Brown. "Elements of Spacecraft Design". American Institute of Aeronautics and Astronautics. Inc. Castle Rock, Colorado, 2002.
- [2] P. Fortescue, G. Swinerd and J. Stark. "Spacecraft Systems Engineering". A John Wiley & Sons, Ltd. 4th. United Kingdom. 2011
- [3] J. R. Wertz. "Spacecraft Attitude Determination and Control". England. Kluwer Academic Publishers. 1990.
- [4] S. García. "Diseño y Construcción de Magnetómetro Triaxial para Análisis y Experimentación de Aislamientos Magnéticos". España. 2013