

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades



**Análisis para la verificación del efecto de torques  
externos en la componente en  $z$  de la velocidad  
angular del satélite Quetzal-1**

Trabajo de graduación en modalidad de Tesis presentado por  
Ivan Andrés Maldonado Carrera  
para optar al grado académico de Licenciado en Física

Guatemala,  
2020



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades



**Análisis para la verificación del efecto de torques  
externos en la componente en  $z$  de la velocidad  
angular del satélite Quetzal-1**


Trabajo de graduación en modalidad de Tesis presentado por  
Ivan Andrés Maldonado Carrera  
para optar al grado académico de Licenciado en Física

Guatemala,  
2020

Vo.Bo.:

(f) Sergio

Dr. Sergio Minera

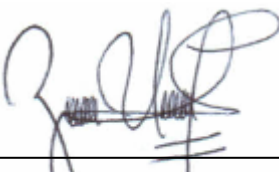
(f) 

Ing. Dan Álvarez

Tribunal Examinador:

(f) Sergio

Dr. Sergio Minera

(f) 

MSc. Zaida Urrutia

(f) 

Ing. Víctor Ayerdi

Fecha de aprobación: Guatemala, 10 de diciembre del 2020.

<b>Prefacio</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>x</b>
<b>1. Introducción y contexto</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>3</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	3
2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
<b>3. Marco teórico</b>	<b>4</b>
3.1. Marcos de referencia . . . . .	4
3.1.1. Marco inercial centrado en la Tierra (ECI) . . . . .	4
3.1.2. Marco fijo en Tierra centrado en la Tierra (ECEF) . . . . .	5
3.1.3. Marco fijo del satélite o cuerpo . . . . .	5
3.2. Rotaciones . . . . .	6
3.2.1. Ángulos de Euler . . . . .	6
3.2.2. Cuaterniones . . . . .	8
3.3. Perturbaciones por torques externos . . . . .	8
3.3.1. Torque aerodinámico . . . . .	9
3.3.2. Torque por presión solar . . . . .	9
3.3.3. Torque por gradiente gravitatorio . . . . .	9
3.3.4. Torque por el campo magnético de la Tierra . . . . .	9
3.4. CubeSat . . . . .	10
3.4.1. Control de actitud . . . . .	10
3.4.2. Sistema de control pasivo . . . . .	10
3.5. Satélite Quetzal - 1 . . . . .	11
3.5.1. Sistema de control pasivo magnético . . . . .	11
3.5.2. Histéresis . . . . .	12
3.5.3. Curvas de histéresis . . . . .	12
3.5.4. Desmagnetización . . . . .	13

3.5.5. Barras de histéresis . . . . .	14
<b>4. Antecedentes</b>	<b>15</b>
4.1. Sistema de determinación de actitud . . . . .	15
4.1.1. Cálculo de cuaterniones . . . . .	16
4.2. Sistema de control de actitud . . . . .	17
4.3. Análisis de perturbaciones por torques externos . . . . .	17
<b>5. Metodología</b>	<b>20</b>
5.1. Modelo de tangente inversa para las curvas de histéresis . . . . .	20
5.2. Correlación de velocidades angulares y normalidad de densidad de campo magnético generado por barras de histéresis . . . . .	24
5.3. Cálculo de energías . . . . .	25
5.4. Cálculo del ángulo entre el eje $z$ y el campo magnético . . . . .	25
5.5. Análisis estadístico semanal . . . . .	25
<b>6. Resultados</b>	<b>27</b>
6.1. Satélite Quetzal-1 - Semana 1 en órbita . . . . .	27
6.1.1. Torques externos e internos por componentes . . . . .	27
6.1.2. Velocidades angulares . . . . .	29
6.1.3. Energía rotacional . . . . .	30
6.1.4. Componente de campo magnético en $z$ y velocidad angular en $z$ . . . . .	31
6.1.5. Fronteras de la curva de histéresis . . . . .	31
6.2. Satélite Quetzal-1 - 21 semanas en órbita . . . . .	32
6.2.1. Torques externos e internos . . . . .	32
6.2.2. Velocidades angulares . . . . .	35
6.3. Pruebas de normalidad y correlación con la velocidad angular en el eje $z$ . . . . .	35
6.4. Satélite Quetzal-1 - Resumen de datos . . . . .	36
6.4.1. Velocidades angulares . . . . .	36
6.4.2. Densidad de flujo magnético promedio de barras de histéresis . . . . .	37
<b>7. Discusión</b>	<b>40</b>
<b>8. Conclusiones</b>	<b>42</b>
<b>9. Recomendaciones</b>	<b>43</b>
<b>10. Bibliografía</b>	<b>45</b>
<b>11. Anexos</b>	<b>46</b>
<b>A. Códigos utilizados</b>	<b>46</b>
A.1. Quetzal1_Distrubance_Analyzer.m . . . . .	46
A.2. Quetzal1_Distrubance_Mean_Analyzer.m . . . . .	75
A.3. hystCurve.m . . . . .	77
<b>Lista de símbolos</b>	<b>78</b>

Desde chiquito siempre quise ser alguien. Siempre tuve el sueño que cuando fuera grande, haría algo para ayudar a la humanidad. Sin embargo, mi sueño no era respaldado por mis acciones. Conforme fui creciendo, me fui dando cuenta de mis habilidades. Me di cuenta que si me esforzaba, podía ser bueno para varias cosas.

Por otro lado, conforme fui creciendo, me empezaron a gustar temas del universo y como a todos, la mecánica cuántica. En mi inocencia me ponía a buscar videos acerca de estos temas y aprendía algunos significados de estos muy superficialmente, como por ejemplo, el entrelazamiento cuántico. No fue hasta este semestre que vi un poco acerca del entrelazamiento cuántico y, para ser sinceros, no es algo que se pueda comprender del todo.

Cuando me tocó escoger mi carrera, estaba decidido por estudiar mecatrónica. Sin embargo, el día de la inscripción, ese niño curioso saltó en mí y dijo: «No, estudiaremos física». Puedo decir que el camino por el cual me llevó esa decisión ha sido bastante gratificante. Se puede decir que no solo pude alimentar mi hambre de conocimiento, si no que también, siento que puedo cumplir mi sueño de ayudar a la humanidad.

Es gratificante estar satisfecho con lo que se ha hecho, y déjenme decirles no es fácil. El camino no es siempre una línea recta. Hay momentos donde uno duda lo que hace. Mi consejo es, hay que seguir. El esfuerzo que uno pone, siempre será recompensado. La clave es ser constantes.

Por último, culaquier persona que desea continuar y profundizar con esta investigación y tenga dudas con respecto a este trabajo, lo invito a comunicarse conmigo. No hay mejor cosa que preguntar.

---

## Agradecimientos

---

Primero que nada, quisiera agradecerle a mis padres por darme la oportunidad de superarme en mi vida, por su arduo trabajo y por su amor de cada día. Sin ellos, yo no sería la persona que soy ahora. Espero que, aún que no lean este trabajo, estén orgullosos de mí.

A mi otra mitad, porque en estos 2 años he aprendido lo que es amar en verdad a una persona. También porque, sin la motivación que recibo de ella, este trabajo de graduación no estaría terminado. Gracias por todas las noches de desvelos y por motivarme a querer ser una mejor persona. Sin ti, yo no estaría en el equipo del satélite Quetzal-1. Espero que tu vida esté llena de logros. Yo sé lograrás todo lo que te propongas.

A mi compañero de trabajo de graduación, por todas las presentaciones que hicimos juntos y por el apoyo que nos brindábamos cada semana. A las amistades que tuve en la universidad, por todas esas aventuras que tuvimos y por los problemas que superamos. A mis compañeros de clase, porque sin ellos la carrera no hubiera sido tan divertida. Ellos le brindaban ese toque de alegría que solo se puede volver a revivir en el colegio.

A mi psicóloga, quien le dio orden a mi vida, escuchó todas mis quejas y me hizo recobrar esa confianza en mí mismo. A mis amigos, les agradezco por ser sinceros y por siempre estar cuando uno los necesita.

A mis asesores, Sergio y Dan, por su sabiduría, nuestras constantes reuniones y su tiempo. No cabe duda que ustedes son grandes personas.

A Irene, que es la responsable de despertar el lado experimental de todo físico en la carrera y que, para nosotros fue como una mentora y nuestra mamá en la carrera. A Siba, un profesor muy inteligente, pero sobre todo, una de las personas más humildes y alegres que conozco. A Juan, por sus grandes enseñanzas en clase y por mostrarnos su lado bromista. Espero que usted se sienta en confianza con nosotros así como nosotros nos sentimos en confianza con usted. A Dorval, que en mi opinión, es el mejor maestro de la Universidad del Valle. A Mario, que fue un amigo para mí; él fue uno de los primeros profesores en reconocerme. A Aristondo, porque a pesar que nunca recibí clases con él, aprendí bastante de él. Gracias por confiar en mí para ser su auxiliar. A Olguita, por haber sido el pilar del departamento. A Don Byron, por siempre estar para nosotros.

---

## Lista de figuras

---

3.1. Marco ECI [19] . . . . .	5
3.2. Marco ECEF [16] . . . . .	5
3.3. Marco fijo del satélite [19] . . . . .	6
3.4. Diagrama de rotaciones sobre los ángulos de Euler, donde rotación 3 es con respecto a <i>yaw</i> , la rotación 2 es con respecto a <i>pitch</i> y la rotación 1 es con respecto a <i>roll</i> [11]	7
3.5. Tamaño de CubeSats [9] . . . . .	10
3.6. Aumento de dominios magnéticos alineados con el campo magnético para un material ferromagnético [7]. . . . .	12
3.7. Curva de histéresis [7] . . . . .	13
4.1. Vector magnético del Quetzal-1 antes (4.1a) y después (4.1b) de calibración del magnetómetro [3] . . . . .	16
4.2. Gráficas de aceleración angular y velocidad angular de la semana 21 desde el lanzamiento del satélite, obtenidas con el programa del anexo A.1. . . . .	18
4.3. Gráfica de torques externos de la semana 21 desde el lanzamiento del satélite, obtenidas con el programa del anexo A.1. . . . .	18
5.1. Curvas de histéresis según modelo de tangente inversa [5] . . . . .	21
5.2. Superposición de la Figura 5.1a y la Figura 5.1b [5]. . . . .	21
5.3. Modelo de tangente inversa para curva de histéresis en el eje $x$ y eje $y$ para la primera semana en órbita del satélite Quetzal-1 antes de estabilización de actitud. La cota superior se muestra de color naranja y la cota inferior se muestra de color azul. . . .	22
5.4. Modelo de tangente inversa para curva de histéresis en el eje $x$ y eje $y$ para la segunda semana en órbita del satélite Quetzal-1 después de estabilización de actitud. La cota superior se muestra de color naranja y la cota inferior se muestra de color azul. . . .	23
5.5. Simulación para una órbita de la curva de histéresis del eje $x$ y $y$ antes (arriba) y después (abajo) que la actitud se estabilice. Las cotas son dadas por el modelo de tangente inversa y las curvas de histéresis son dadas por el modelo de Flatley. La magnetización que ha sido corregida permanece dentro de las cotas y estas son mostradas en rojo; los otros datos son mostradas en azul [7]. . . . .	24
6.1. Comparación de torques externos e internos en el eje $x$ contra la velocidad angular $w$ en el eje $x$ . . . . .	28
6.2. Comparación de torques externos e internos en el eje $y$ contra la velocidad angular $w$ en el eje $y$ . . . . .	28
6.3. Comparación de torques externos e internos en el eje $z$ contra la velocidad angular $w$ en el eje $z$ . . . . .	29
6.4. Comparación de velocidades angulares en los ejes $x$ , $y$ y $z$ . . . . .	30

6.5. Energía cinética rotacional y energía potencial rotacional para la primera semana en órbita del satélite Quetzal-1. . . . .	30
6.6. Gráfica de latitud con longitud donde los puntos están coloreados con respecto al campo magnético $mT$ (arriba) y gráfica de latitud con longitud donde los puntos están coloreados con respecto a la velocidad angular en el eje $z$ $^{\circ}/s$ . Los datos del campo magnético están normalizados. . . . .	31
6.7. Comparación en mapamundi de campo magnético en el eje $z$ y velocidad angular $w$ en el eje $z$ . . . . .	32
6.8. Comparación de torques externos e internos en el eje $x$ contra la velocidad angular $w$ en el eje $x$ . . . . .	33
6.9. Comparación de torques externos e internos en el eje $y$ contra la velocidad angular $w$ en el eje $y$ . . . . .	33
6.10. Comparación de torques externos e internos en el eje $z$ contra la velocidad angular $w$ en el eje $z$ . . . . .	34
6.11. Comparación de torques externos e internos en el eje $z$ contra la velocidad angular $w$ en el eje $z$ , sin torque neto. . . . .	34
6.12. Comparación de velocidades angulares en los ejes $x$ , $y$ y $z$ . . . . .	35
6.13. Gráfica de semanas del satélite Quetzal-1 con la velocidad angular en el eje $x$ , donde los puntos están coloreados con respecto a la aceleración constante en el eje $z$ $^{\circ}/s^2$ (arriba) y gráfica de semanas del satélite Quetzal-1 con la velocidad angular en el eje $y$ , donde los puntos están coloreados con respecto a la aceleración constante en el eje $z$ $^{\circ}/s^2$ (abajo). . . . .	36
6.14. Gráfica de semanas del satélite Quetzal-1 con la densidad de flujo magnético generado en la barra de histéresis del eje $x$ , donde los puntos están coloreados con respecto a la aceleración constante en el eje $z$ $^{\circ}/s^2$ (arriba) y gráfica de semanas del satélite Quetzal-1 con la densidad de flujo magnético generado en la barra de histéresis del eje $y$ , donde los puntos están coloreados con respecto a la aceleración constante en el eje $z$ $^{\circ}/s^2$ (abajo). . . . .	38

---

## Lista de cuadros

---

4.1. Parámetros del sistema magnético pasivo. <sup>†</sup> . . . . .	17
4.2. Parámetros para la función <i>CubeSatDisturbanceAnalysis.m</i> <sup>†</sup> . . . . .	19
5.1. Parámetros del sistema magnético pasivo. <sup>†</sup> . . . . .	26
6.1. Parámetros del sistema magnético pasivo. <sup>†</sup> . . . . .	39

Este trabajo de graduación tiene como objetivo principal determinar, por medio de un análisis de torques externos, si estos provocan algún efecto cuantificable sobre la velocidad angular en el eje  $z$  del satélite Quetzal-1. Dado que el satélite se encuentra orbitando cerca de la tierra, los torques a estudiar son el torque aerodinámico, el torque por presión solar, el torque por gradiente de gravedad y el torque por campo magnético. El análisis fue realizado a partir de las gráficas obtenidas a partir de los programas *Quetzal1\_Disturbance\_Analizer.m*, *hystCurve.m* y *Quetzal1\_Disturbance\_Mean\_Analizer.m*. Se obtuvieron gráficas de velocidad angular, de torques externos, de torque interno magnético, torque interno de barras de histéresis, la densidad de flujo magnético generado en las barras de histéresis y la alineación con el campo magnético de la tierra.

Se obtuvo como resultado principal que, para el satélite Quetzal-1, entre mayor sea la alineación con el campo magnético y menor sean las oscilaciones en los ejes donde se encuentran las barras de histéresis (eje  $x$  y eje  $y$ ), menos control se tendrá sobre los ejes del marco referencia Body del satélite (principalmente el eje  $z$ ), *i.e.*, variaciones en las velocidades angulares. Por otro lado, se obtuvo que el torque con mayor influencia en el eje  $z$  del satélite es el torque aerodinámico, y se descartaron los torques por gradiente gravitatorio, por presión solar y por torque magnético en el eje  $z$ , debido a que sus magnitudes eran insignificantes a comparación con la magnitud del torque aerodinámico.

---

## Introducción y contexto

---

Desde temprana edad, los niños sueñan con temas relacionados al espacio. Estos temas varían desde cohetes espaciales, exploración interplanetaria, el estudio de los cuerpos celestes, entre otros. Motivados por estas grandes ideas, los niños sueñan con realizar sus estudios relacionados a temas espaciales, para así poder aportar grandes avances y descubrimientos a la sociedad. Sin embargo, muchos niños no logran cumplir estos sueños. Esto no es porque no sean capaces, sino que, los países donde viven son de escasos recursos, y en estos no se pueden realizar estudios en el área aeroespacial debido a que ninguna universidad los ofrece.

Recientemente se abrió una puerta para todos los niños residentes de Guatemala. El 28 de abril del año 2020, desde el módulo Kibo de JAXA en la Estación Espacial Internacional EEI, fue lanzado al espacio el primer satélite guatemalteco, Quetzal-1. El satélite fue construido por un equipo de alumnos y catedráticos de la Universidad del Valle de Guatemala. Este fue patrocinado por distintas embajadas y universidades del mundo.

El satélite es del tipo CubeSat 1U, el cuál es un cubo con aristas de 10 *cm*. Los satélites CubeSat tienen como objetivo principal facilitar el acceso al espacio a estudiantes universitarios. Quetzal-1 cuenta con un sistema de control pasivo magnético, lo cuál significa que para controlar su orientación, el satélite cuenta con un imán en su eje  $z$  y un par de barras de histéresis de material HyMu 80 en los ejes  $x$  y  $y$  para alinearse con el campo magnético. El imán alinea el satélite con el campo magnético de la Tierra, mientras que las barras están encargadas de disminuir las velocidades angulares en todos los ejes mediante el efecto de histéresis. Esto permite tener control del eje  $z$ . Este sistema fue diseñado por el módulo de ADCS (determinación de actitud y sistema de control) del satélite Quetzal-1.

Una semana después del lanzamiento del satélite, el módulo ADCS logró su misión principal: estabilizar los ejes del satélite. Las velocidades angulares disminuyeron de  $[-20, 20]$  *deg/s* a  $[-1, 1]$  *deg/s*, tanto en el eje  $x$  como el eje  $y$ . Por otro lado, la velocidad angular en el eje  $z$  disminuyó de  $[-20, 20]$  *deg/s* a velocidades una velocidad fija de 3 *deg/s*. Sin embargo, a partir del 22 de mayo del 2020, la velocidad angular en el eje  $z$  comenzó a aumentar.

El objetivo general de este trabajo de graduación es realizar un análisis de torques externos para determinar si estos tienen algún efecto cuantificable en el aumento de la velocidad angular en el eje  $z$  del satélite Quetzal-1. Los torques que se analizarán en este trabajo de graduación son: torque aerodinámico, torque por presión solar, torque por gradiente gravitatorio y torque por campo magnético debido al imán permanente y a las barras de histéresis. Además, se analizará el efecto

que tiene la alineación del satélite con el campo magnético sobre el sistema de control de actitud del mismo.

Para generar las gráficas del análisis, se utilizaron las funciones del código en el anexo A.1 generado por Aguilar [3] y editada por el autor de este trabajo de graduación y los programas generados en este trabajo de graduación, como se puede observar en los anexos A.2 y A.3.

### 2.1. Objetivo general

Determinar, por medio de un análisis de torques externos, si estos provocan algún efecto cuantificable sobre la velocidad angular en el eje z del satélite Quetzal-1.

### 2.2. Objetivos específicos

- Investigar la influencia del torque aerodinámico, torque por presión solar y torque por el gradiente gravitacional, en el satélite.
- Detallar posibles causas adicionales para el fenómeno de aceleración en el eje z del satélite.

### 3.1. Marcos de referencia

Para que los movimientos de un objeto tengan sentido, es necesario que estos estén medidos desde un marco de referencia [17]. El satélite Quetzal-1, utiliza como marcos de referencia los siguientes:

- Marco de referencia inercial centrado en la Tierra (ECI por sus siglas en inglés)
- Marco fijo en Tierra centrado en la Tierra (ECEF por sus siglas en inglés)
- Marco fijo del satélite *Body*

#### 3.1.1. Marco inercial centrado en la Tierra (ECI)

El Marco Inercial Centrado en la Tierra (ECI) en sus siglas en inglés, es un marco de referencia con origen en el centro de la Tierra. El eje  $x$  se encuentra en el equinoccio de primavera, *i.e.*, la intersección entre el plano ecuatorial de la Tierra y el plano orbital de la Tierra con respecto al Sol. El eje  $z$  se encuentra apuntando hacia el Polo Norte, justo en el eje rotacional de la Tierra y, por regla de la mano derecha entre estos dos ejes, se define el eje  $y$  [8], tal y como se observa en la Figura 3.1.

Cabe mencionar que el equinoccio de primavera no es fijo. Es por eso que es necesario determinar un «epoch date» para medir el equinoccio. Un ejemplo de ECI es referido como **J2000**, el cual coloca al equinoccio medido a las 12 : 00 *h Terrestrial Time*, en el 1 de enero del año 2000 [8].

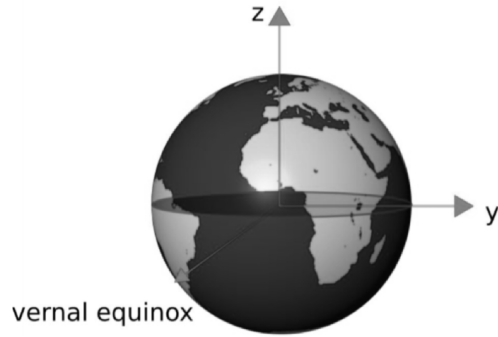


Figura 3.1: Marco ECI [19]

### 3.1.2. Marco fijo en Tierra centrado en la Tierra (ECEF)

El Marco Fijo en Tierra Centrado en la Tierra tiene su origen en el centro de la Tierra. Por otro lado, el eje  $z$  se encuentra en el eje rotacional de la Tierra y el eje  $x$  se encuentra en la latitud  $0^\circ$  y longitud  $0^\circ$ , tal y como se observa en la Figura 3.2. Debido a estas condiciones, este marco gira con la Tierra a una velocidad angular de  $7.2921 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$  y todos sus puntos están fijos [8].

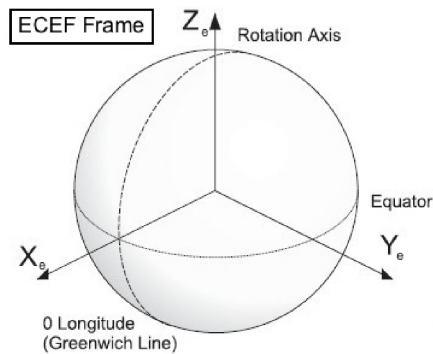


Figura 3.2: Marco ECEF [16]

### 3.1.3. Marco fijo del satélite o cuerpo

El Marco Fijo del Quetzal - 1 se encuentra fijo en su centro geométrico, con su eje  $z$  en su antena y el plano  $x - y$  tal y como se muestra en la Figura 3.1 [19].

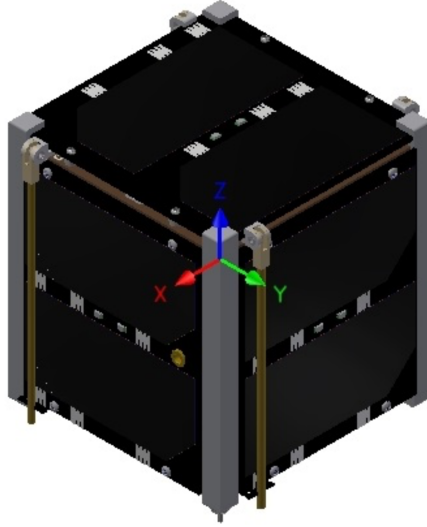


Figura 3.3: Marco fijo del satélite [19]

## 3.2. Rotaciones

Sea un vector  $\mathbf{r}_I$  definido en un marco de referencia  $I$ . Si se desea llevar a  $\mathbf{r}_B$  a un marco de referencia  $B$ , es necesario aplicar un operador  $\mathbf{R}_{BI}$ , tal que

$$\mathbf{r}_B = \mathbf{R}_{BI}\mathbf{r}_I \quad (3.1)$$

donde  $\mathbf{r}_B$  es un vector definido en el marco de referencia  $B$ . Según [16], se dice que  $\mathbf{R}_{BI}$  es una matriz de rotación si cumple con los siguientes argumentos:

- Rota vectores en un marco de referencia.
- Transforma vectores en un marco de referencia a otro.
- Describe la orientación entre dos ejes de coordenadas por medio de vectores columna con los senos y cosenos que describen la rotación de las componentes de un vector en el marco de referencia  $I$  a un marco de referencia  $J$ .

Finalmente, para una matriz de transformación se cumple que

$$\mathbf{R}^T = \mathbf{R}^{-1} \quad (3.2)$$

### 3.2.1. Ángulos de Euler

Los ángulos de Euler indican que una rotación matricial puede ser lograda a partir de una secuencia de 3 rotaciones angulares. Estas rotaciones se realizan con respecto a los ángulos que se encuentran alrededor de los vectores canónicos  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$  y  $\hat{z}$ , los cuales son:

$$\phi := \textit{Roll} \text{ para el eje } x \quad \theta := \textit{Pitch} \text{ para el eje } y \quad \psi := \textit{Yaw} \text{ para el eje } z$$

Estas rotaciones se definen a continuación:

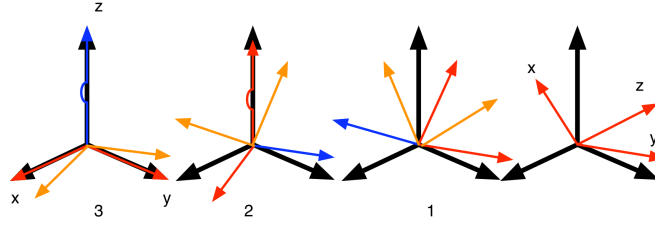


Figura 3.4: Diagrama de rotaciones sobre los ángulos de Euler, donde rotación 3 es con respecto a *yaw*, la rotación 2 es con respecto a *pitch* y la rotación 1 es con respecto a *roll* [11]

Como se mencionó con anterioridad, para encontrar la matriz de rotación deseada, se debe realizar una secuencia de 3 rotaciones sobre los ángulos de Euler. Para esto se comienza escogiendo la primera rotación. Para esto tenemos 3 opciones: con respecto al eje  $x$ ,  $y$  o  $z$ . Por conveniencia se escoge la rotación con respecto al eje  $z$  en el ángulo  $\psi$ , tal que:

$$\mathbf{R}_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Se prosigue escogiendo una segunda rotación. Esta puede ser en *yaw*, *pitch* o *roll*. Rotar en *yaw* es lo mismo a sumarle al ángulo  $\psi$  en la ecuación 3.3, entonces quedan solamente dos opciones, rotar en *pitch* o en *roll*. Por conveniencia se escoge *pitch*, tal que

$$\mathbf{R}_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Finalmente, para la tercera rotación se tiene de opción rotar en *roll* y *yaw*. Para esta ocasión se escoge rotar en *roll*, tal que

$$\mathbf{R}_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Tenemos que la matriz de rotación definida a partir de los ángulos de Euler, un marco de referencia  $I$  cualquiera, a un marco de referencia  $B$  cualquiera, se puede escribir como

$$\mathbf{R}^{I,B} = \mathbf{R}_{z,\psi} \mathbf{R}_{y,\theta} \mathbf{R}_{x,\phi} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Por lo que, un vector en el marco de referencia  $B$  se puede escribir en términos la matriz de transformación 3.6 y un vector en el marco de referencia  $I$

$$\mathbf{r}_B = \mathbf{R}^{I,B} \mathbf{r}_I \quad (3.7)$$

Existen 12 secuencias de rotaciones posibles para llegar a la matriz 3.6 [19]. Sin embargo, es mucho más simple y más eficiente computacionalmente, trabajar con los cuaterniones [11].

### 3.2.2. Cuaterniones

Dado que las matrices de rotación cuentan con 9 elementos en la matriz, para la representación de actitud se recurren a los cuaterniones. Esto se debe a que los cuaterniones utilizan 4 parámetros, y dado que los cuaterniones no cuentan con funciones trigonométricas, esto los hace ser rápidamente computables [18].

Según [18] el cuaternion se define como un número hiper complejo, tal que

$$\bar{\mathbf{q}} = (q_0, \mathbf{q}^T)^T \quad (3.8)$$

Donde,  $\bar{\mathbf{q}}$  es un vector de cuatro componentes con su primera componente  $q_0$  y  $\mathbf{q}$  es un vector de 3 componentes que representa las 3 componentes de  $\bar{\mathbf{q}}$ . Por otro lado,  $q_0$  y  $\mathbf{q}$  se definen como

$$q_0 = \cos \frac{\phi}{2} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{a} \sin \frac{\phi}{2} \quad (3.10)$$

Donde  $\mathbf{a}$  es el *eje de Euler* y  $\phi$  es el *ángulo de Euler*, que vienen del teorema de Euler. Este teorema indica que existe una rotación general sobre un eje fijo  $\mathbf{a}$  y un ángulo  $\phi$ , para rotar un vector en un marco de referencia  $I$  a un marco de referencia  $B$  [19].

Los cuaterniones transforman de la siguiente manera

$$\mathbf{r}_B = \bar{\mathbf{q}}^T \mathbf{r}_I \bar{\mathbf{q}} \quad (3.11)$$

### 3.3. Perturbaciones por torques externos

Según la segunda ley de Newton rotacional: la aceleración angular de un objeto rígido giratorio en torno a un eje fijo es proporcional al momento de torsión neto que actúa en torno a dicho eje [15], tal que

$$\sum \tau_{ext} = I\alpha \quad (3.12)$$

Donde  $\tau_{ext}$  es el torque externo,  $I$  es el momento de inercia y  $\alpha$  es la aceleración angular. Entonces, los torques externos pueden causar aceleración angular, lo cual conlleva a un aumento en la velocidad angular en el satélite. Es por eso que es necesario poder simular los torques que pueden afectar al satélite para así poder diseñar un sistema de control que sea capaz de controlar la velocidad angular del satélite.

Según Sorolla [16], en las orbitas LEO (Orbita baja de la Tierra), los torques externos de mayor magnitud son,

- Torque por gradiente gravitatorio
- Torque aerodinámico
- Torque por presión solar

- Torque por el campo magnético de la Tierra

y según [19], el torque aerodinámico representa el mayor torque. Cabe mencionar que para el análisis de torques para este trabajo de graduación, se utilizaron los cuatro torques mencionados con anterioridad. A continuación se hablará de los modelos utilizados para estos torques.

### 3.3.1. Torque aerodinámico

El torque aerodinámico se define en [19] como

$${}^B\mathbf{L}_D = \frac{1}{2}\rho C_d ({}^B\mathbf{S} \cdot {}^B\mathbf{V}) ({}^B\mathbf{V} \times {}^B\mathbf{r}_d) \quad (3.13)$$

Donde  ${}^B\mathbf{L}_D$  es el torque aerodinámico,  $\rho$  es la densidad atmosférica por donde pasa el satélite,  $C_d$  es el coeficiente de arrastre del satélite,  ${}^B\mathbf{S}$  es el vector de área de las caras del satélite en el marco *Body*,  ${}^B\mathbf{V}$  es el vector velocidad del satélite en el marco *Body* y  ${}^B\mathbf{r}_d$  es el vector del centro geométrico del satélite al centro de masa.

### 3.3.2. Torque por presión solar

El torque por presión solar se define en [19] como

$${}^B\mathbf{F}_{SP} = -P_S c_R \text{diag} ({}^B\mathbf{S}) {}^B\hat{\mathbf{s}} \quad (3.14)$$

Donde  $P_S$  es la presión solar en la Tierra,  $c_R$  es el coeficiente de reflectividad del satélite,  ${}^B\mathbf{S}$  es el vector de la Tierra al Sol en el marco *Body* y  ${}^B\hat{\mathbf{s}}$  es su vector unitario. A partir de la ecuación 3.14 se calcula el torque por presión solar

$${}^B\mathbf{L}_{SP} = {}^B\mathbf{r}_d \times {}^B\mathbf{F}_{SP} \quad (3.15)$$

### 3.3.3. Torque por gradiente gravitatorio

El torque por gradiente gravitatorio se define en [19] como

$${}^B\mathbf{L}_G = \frac{3\mu_e}{R_c^5} {}^B\mathbf{R}_c \times [I] {}^B\mathbf{R}_c \quad (3.16)$$

Donde  $\mu_e$  es el parámetro gravitacional de la Tierra ( $3.986 \times 10^5 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$ ),  ${}^B\mathbf{R}_c$  es el vector desde el centro de la Tierra hasta el centro de masa del satélite en el marco *Body* e  $[I]$  es la matriz del momento de inercia del satélite, la cuál para el Quetzal-1, Álvarez [19] define como

$$[I]_{\text{Quetzal-1}} = \begin{bmatrix} 1816.341 & 0 & 0 \\ 0 & 1882.502 & 0 \\ 0 & 0 & 1621.203 \end{bmatrix} \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 \quad (3.17)$$

### 3.3.4. Torque por el campo magnético de la Tierra

El torque por campo magnético se define en [14] como

$${}^B\mathbf{L}_M = {}^B\mathbf{m} \times {}^B\mathbf{B} \quad (3.18)$$

Donde  ${}^B\mathbf{m}$  es el momento magnético del satélite en el marco *Body* y  ${}^B\mathbf{B}$  es la densidad flujo de campo magnético inducido en el satélite. En este caso, el flujo de campo magnético de interés es el campo magnético de la Tierra.

## 3.4. CubeSat

El estándar CubeSat fue creado por la Universidad Politécnica del Estado de California en el año de 1999 [4]. Según Mehrparvar [10], el propósito del proyecto CubeSat es la reducción de costos y tiempo de producción, aumento de accesibilidad al espacio, y aumento de lanzamientos. Los satélites CubeSat pueden ser de tipo 1U, 1.5U, 2U, 3U, 6U y 12U, donde un satélite 1U es aquel que tiene un volumen  $V = 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  y una masa de alrededor de  $1 \text{ kg}$  [19]. En la Figura 3.5 se observa la comparación de tamaños para los satélites tipo CubeSat mencionados.

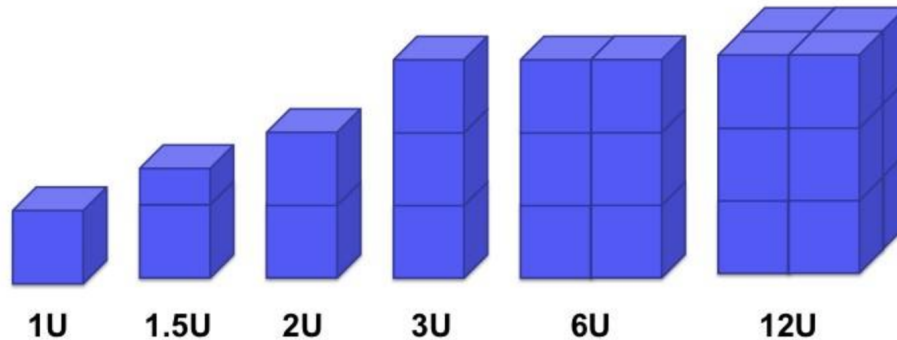


Figura 3.5: Tamaño de CubeSats [9]

### 3.4.1. Control de actitud

La palabra actitud se refiere a la orientación y estabilización angular de un marco de referencia *Body* con respecto a un marco de referencia externo definido en el espacio [16]. El control de actitud se basa en mantener a un satélite en la orientación deseada. La desalineación del satélite es medida a partir de sensores, y a partir de estas mediciones es como se realinea el satélite [16].

Existen dos tipos de sistemas generales para alinear el satélite. Cada uno tiene sus propios tipos de sistemas. Los dos tipos de sistemas son:

- Sistema de control activo.
- Sistema de control pasivo.

Este trabajo de graduación hablará solamente del sistema de control pasivo.

### 3.4.2. Sistema de control pasivo

Los sistemas de control pasivos utilizan los fenómenos físicos del ambiente que los rodea para alcanzar estabilidad. Su objetivo es aprovecharse de uno de estos fenómenos mientras reduce los otros [16]. Estos fenómenos son los torques externos del satélite. Ejemplos de estos sistemas de control son los siguientes

- Estabilización de *spin*: Se usa el giroscópico como mecanismo de estabilización. Junto a este se suelen incorporar propulsores [16].

- Estabilización por gradiente gravitacional: Se utiliza el torque de restitución que se genera en el eje de inercia mayor debido al gradiente gravitacional [16].
- Estabilización por campo magnético: Con el fin de alinearse con un campo magnético, se utiliza un imán permante para el control de dos ejes perpendiculares al imán y se implementa material ferromagnético para tener control del tercer eje [19].

### 3.5. Satélite Quetzal - 1

El satélite guatemalteco Quetzal-1 comenzó a planificarse desde el 2014, donde se aprovechó el impulso que tenía la Universidad del Valle de Guatemala en la participación de competencias espaciales. En este año, se decidió cual iba a ser la misión del satélite. La misión, de manera resumida, es diseñar, construir y operar un satélite tipo CubeSat 1U para probar el prototipo de un sensor multiespectral.

El diseño del satélite Quetzal-1 fue dividido en 11 módulos:

- *Project Management*
- *Systems Engineering*
- *Structure*
- *Thermal*
- *Power*
- *On-Board Computer (OBC)*
- *Command & Data Handling (CDH)*
- *Payload*
- *Ground Control Station (GCS)*
- *Communications (Comms)*
- *Attitude Determination & Control System (ADCS)*

Luego de 6 años de arduo trabajo, el satélite Quetzal-1 fue llevado a la Estación Espacial Internacional (EEI) el 6 de marzo del 2020, y desde el mismo lugar fue lanzado al espacio el día 28 de abril del 2020.

El módulo de ADCS, el cual es el encargado del sistema de control y la determinación de actitud, utilizó un sistema de control pasivo magnético para poder alinear el satélite con el campo magnético de la Tierra.

#### 3.5.1. Sistema de control pasivo magnético

El sistema de control de actitud fue diseñado por Álvarez [19]. El objetivo de este sistema fue estabilizar las oscilaciones en los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  del satélite mediante la alineación con el campo magnético de la Tierra. Para esto se utilizó un imán permante posicionado en el eje  $z$  y un par de barras de histéresis hechas del material HyMu 80. Estas fueron posicionadas en los ejes  $x$  y  $y$ .

El imán permanente se encargó de estabilizar al satélite en el eje  $x$  y  $y$  mientras las barras histéresis se encargaron de estabilizar el eje  $z$ . A continuación se explicará la teoría del funcionamiento de las barras de histéresis con el objetivo de entender cómo estas estabilizaron al satélite en el eje  $z$ .

### 3.5.2. Histéresis

Un material ferromagnético logra magnetizarse cuando se ejerce en él un campo magnético variable. En este ciclo, la regiones de momentos magnéticos alineados o dominios magnéticos son cambiados conforme el campo magnético aplicado varía, y con ello se genera fricción dentro del material [14], como se observa en la Figura 3.6. Gerhardt [7] define la relación del campo magnético y la densidad de flujo magnético como

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.19)$$

Donde  $\mathbf{B}$  es la densidad de campo magnético,  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío,  $\mathbf{H}$  es el campo magnético y  $\mathbf{M}$  es la magnetización del material ferromagnético, que Gerhardt [7] define como

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \quad (3.20)$$

La magnetización  $\mathbf{M}$  cambia de manera no lineal con respecto a  $\mathbf{H}$ , siguiendo una curva de histéresis [7]. Cabe mencionar que la ecuación 3.19 también es utilizada para materiales no ferromagnéticos. Para estos materiales la magnetización es despreciable, por lo que  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ .

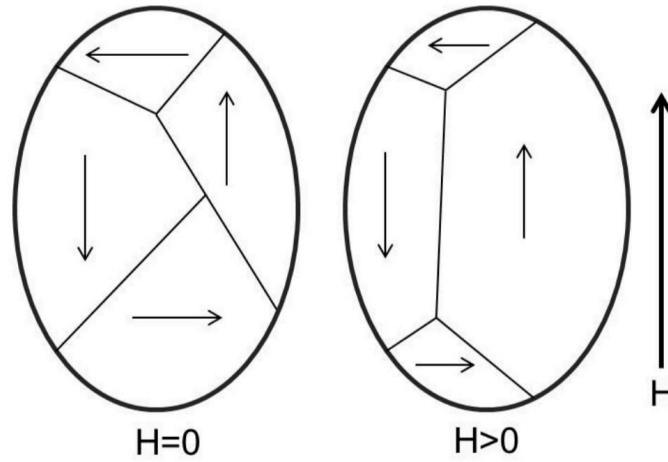


Figura 3.6: Aumento de dominios magnéticos alineados con el campo magnético para un material ferromagnético [7].

### 3.5.3. Curvas de histéresis

Las curvas de histéresis son el resultado de inducir un campo magnético  $H$  variable y medir la densidad de campo magnético  $B$ . La curva de histéresis está definida por tres variables:

- La fuerza coercitiva  $H_c$ , es la cantidad necesaria de campo magnético para llevar la densidad de flujo magnético  $B$  a 0. Esta se observa en la Figura 3.7 como el valor de  $H$  en el intersección con el eje  $x$ .

- La remanencia  $B_r$ , que es la cantidad de densidad de flujo magnético que se encuentra en el material ferromagnético cuando se elimina el campo magnético  $H$ . Esta se observa en la Figura 3.7 como el valor de  $B$  en el intersección con el eje  $y$ .
- La saturación  $B_s$  es el punto donde  $M$  se vuelve constante y el único aumento en  $B$  es lineal con respecto a  $H$ .

El área encerrada en la curva de histéresis representa la energía absorbida por unidad de volumen en el material [7].

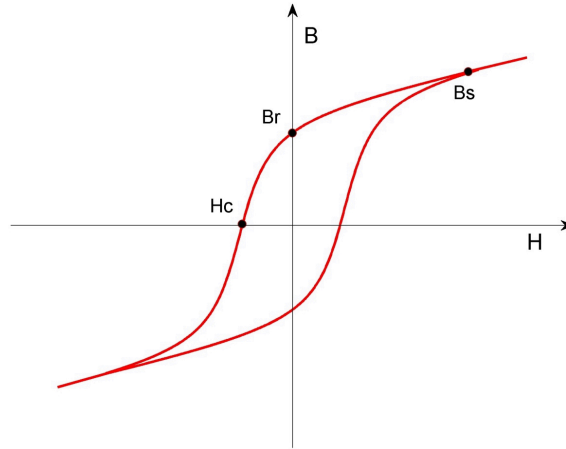


Figura 3.7: Curva de histéresis [7]

La forma de la curva en la Figura 3.7 varía dependiendo de la composición del material, el tratamiento de calor durante la manufacturación, el campo magnético  $H$  aplicado, la frecuencia del ciclo de  $H$ , otros campos aplicados y las dimensiones del material. Cabe mencionar que la curva de histéresis también puede ser afectada por el campo de desmagnetización del material [7].

### 3.5.4. Desmagnetización

Si un material es magnetizado con un campo magnético  $H$ , al momento de este ser retirado, permanece dentro del material un campo magnético y una densidad de flujo magnético. Según Gerhardt [7], afuera del material se encuentra la densidad de flujo magnético simple  $B = \mu_0 H$ , pero dentro del material existe un campo magnético que se opone a  $B$ . Este campo magnético es llamado el campo de desmagnetización  $H_d$ . Al agregar un campo magnético externo  $H_a$ , la ecuación 3.19 se transforma en

$$B = \mu_0(H_a - H_d + M) \quad (3.21)$$

Cabe mencionar que los campos de desmagnetización son difíciles de calcular, sin embargo, estos se pueden considerar proporcionales a la magnetización

$$H_d = N_d M \quad (3.22)$$

Donde  $N_d$  es el factor de desmagnetización.

### 3.5.5. Barras de histéresis

Los sistemas de control pasivo utilizan barras de material de histéresis. Estas generan torques perpendiculares al eje en donde se encuentran. El torque generado por estas se modela utilizando la ecuación 3.18 [7].

Cuando la densidad del flujo magnético es paralelo a las barras, el torque generado es nulo. Al mismo tiempo las barras generan una densidad de flujo de campo magnético  $B$  despreciable, el cual es perpendicular a los ejes; por lo que se puede decir que la densidad de flujo magnético dominante es el de la densidad de flujo magnético aplicado. Por lo tanto, la única contribución de las barras para la ecuación 3.18 es el momento magnético  $\mathbf{m}$  de estas [7].

Para encontrar una ecuación para modelar el momento magnético de las barras, primero se debe suponer que el momento magnético de estas es paralelo a las barras. Por otro lado, se sabe que  $m = M/V$  y que  $H_d = N_d M$ , por lo que al sustituir estas variables en la ecuación 3.21 y resolver para  $m$ , tenemos que el momento magnético de las barras está dado por

$$m = V \left( \frac{B/\mu_0 - H_a}{1 - N_d} \right) \quad (3.23)$$

Donde  $B$  es la densidad de flujo magnético promedio en las barras y  $H_a$  es el campo magnético inducido en las barras.

Es posible simplificar la ecuación 3.23 utilizando el criterio  $L/D > 30$  (donde  $L$  es la longitud de las barras y  $D$  es el diametro de estas) [7]. Este es el caso para Quetzal-1, por lo que la ecuación 3.23 puede escribirse como

$$m = \frac{VB}{\mu_0} \quad (3.24)$$

Gerhardt [7] comenta que esta simplificación tiene un error menor al 2%, sin embargo es necesario medir la curva de histéresis para asegurar que  $H_a$  es despreciable con respecto a  $B/\mu_0$ . Por otro lado, Rawashdeh [14] en su programa SNAP [13], utiliza esta simplificación para calcular el momento magnético de las barras de histéresis. El programa SNAP ha sido utilizado para calcular torques en situaciones similares a las del Quetzal-1, e.g. en KySat-1 [14], por lo que en este trabajo se adoptara dicha simplificación.

Como se mencionó con anterioridad, las barras de histéresis, al magnetizarse, generan energía térmica. Esto se debe a que existe un retraso o «histéresis» al momento de seguir el campo magnético aplicado, debido a la remanencia y a la fuerza coercitiva. Esto causa que se disipe energía por medio de calor y así es como las oscilaciones disminuyen en el eje que se desea controlar. Para el satélite Quetzal-1, el eje a controlar es el eje  $z$ .

El 28 de abril del año 2020, el primer satélite guatemalteco, Quetzal-1, fue lanzado al espacio. A la semana de ser lanzado, el satélite logró alinearse con el campo magnético de la Tierra, disminuyendo sus oscilaciones en los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$ . El módulo encargado de lograr este objetivo fue el módulo de ADCS.

## 4.1. Sistema de determinación de actitud

La actitud del satélite Quetzal-1 es determinada a partir de la medición de los sensores que forman parte del *payload* del satélite. Por otro lado, es necesario tener un algoritmo que sea capaz de poder interpretar estas mediciones y a partir de ellas obtener la actitud del satélite en el sistema de referencia ECI.

Los sensores escogidos para el satélite son:

- Bosch BNO055 Inertial Measurement Unit (IMU)
- Fotodiodos Vishay TEMD6010FX01

La IMU BNO055 cuenta con un magnetómetro, un giroscopio y un acelerómetro, todos de 3 ejes. Dado que el satélite se encuentra en órbita, no es necesario el uso del acelerómetro. Es por eso que para la misión del satélite Quetzal-1, el acelerómetro se encuentra apagado. Por otro lado, los fotodiodos están digitalizados por un convertidor de análogo a digital ADC128D818 de Texas Instruments. El IMU y el ADC son controlados por un microcontrolador ATMEGA328P [19].

Los datos del satélite son enviados a travez de *beacons* (paquetes de datos), donde cada 10 segundos un beacon es enviado. Los paquetes de datos están relacionados con el tiempo. Al recibir los beacons, estos son procesados y colocados en dos hojas de cálculo que se encuentran en la base de datos del proyecto. La primera hoja de cálculo contiene la telemetría del satélite y la segunda hoja de cálculo contiene las velocidades del satélite. Los datos son analizados por medio de dos programas del autor [3]. Estos programas son:

- *Quetzal1\_Disturbance\_Analyzer.m*

- *Quetzal1\_Attitude\_Analyzer.m*

Los cuales están escritos en el lenguaje de *MATLAB*.

#### 4.1.1. Cálculo de cuaterniones

Los dos programas mencionados con anterioridad calculan, de la misma manera, los cuaterniones para los transformar vectores del marco de referencia ECI al marco de referencia Body.

El proceso comienza calculando el vector magnético unitario y el vector solar unitario en el marco Body. Esto se realiza mediante el uso de las mediciones que realiza el satélite, *i.e.*, por medio de las mediciones del magnetómetro y los fotodiodos. El vector magnético recibe una calibración debido a que otros componentes magnéticos o electronicos dentro del satélite pueden generar campos magnéticos distintos al que se desea medir: el campo magnético de la Tierra [19]. En el programa, Aguilar [3] utiliza la calibración propuesta en el trabajo de Álvarez [19]. En la Figura 5.1 se observa cómo son las mediciones del campo magnético de la Tierra antes y después de la calibración. Por otro lado, para el cálculo del vector solar se toma en cuenta la degradación que sufren los sensores [7]. Esta degradación provoca que la medición máxima de voltaje de los sensores disminuya. La medición máxima de voltaje es de 2.5 V [3].

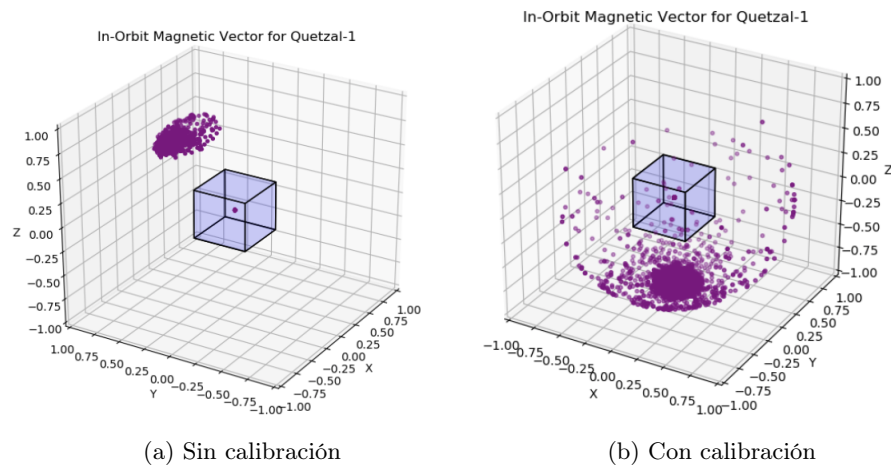


Figura 4.1: Vector magnético del Quetzal-1 antes (4.1a) y después (4.1b) de calibración del magnetómetro [3]

Una vez calculados los vectores en el marco Body, se procede a calcular los vectores en el marco ECI junto a los eclipses por donde pasa el satélite. Para esto son utilizadas las funciones proporcionadas por el *CubeSat Toolbox* de [12].

Por último se prosigue a calcular los cuaterniones. En este proceso se ejecuta el método «Single Values Decomposition» (SVD), el cuál estima la matriz de actitud optima para resolver el problema de wahba y su cuaternion correspondiente [3]. El problema de wahba es explicado en el trabajo de Álvarez [19].

## 4.2. Sistema de control de actitud

El satélite Quetzal-1, cuenta con un sistema pasivo magnético de control de actitud, el cual fue diseñado por Álvarez [19]. Como se mencionó anteriormente, para alinearse con el eje  $x$  y  $y$ , el satélite cuenta un imán cilíndrico permante paralelo al eje  $z$ ; según la ecuación 3.18, este genera un torque en los ejes antes mencionados. Por otro lado, para poder controlar las oscilaciones en el eje  $z$ , el satélite cuenta con una barra de histéresis HyMu 80 paralela al eje  $x$  y otra barra de histéresis (del mismo material que la anterior) paralela al eje  $y$  [19]. Las barras fueron donadas por David Gerhardt y al mismo tiempo la caracterización fue hecha por Gerhardt [6]. Los parámetros para el sistema pasivo magnético de control de actitud se encuentran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Parámetros del sistema magnético pasivo.<sup>†</sup>

Parámetro	Valor	Unidad
Momento magnético del imán cilíndrico	0.7363	$A \cdot m^2$
Longitud de barra de histéresis	95	$mm$
Diametro de barra de histéresis	1	$mm$
Campo de coercividad de barra de histéresis $H_c$	0.3381	$A/m$
Remanencia de barra de histéresis $B_r$	$6.0618 \cdot 10^{-4}$	$Tesla$
Saturación de barra de histéresis $B_s$	0.3000	$Tesla$

<sup>†</sup>El parámetro para el iman permanente está dado por [19] y los parámetros de la barra de histéresis HyMu 80 están dados por [6]

## 4.3. Análisis de perturbaciones por torques externos

En este trabajo de graduación se utilizó el programa *Quetzal1\_Disturbance\_Analyzer.m*. La función de este programa fue simular los torques externos que afectan el satélite mediante el uso de la función *CubeSatDisturbanceAnalysis.m* de la librería CubeSat Toolbox de *Princeton Satellite Systems* [12]. Los parámetros que recibe esta función se observan en la Tabla 4.2. A partir de estos, se calcularon los torques presentados en las secciones 3.3.1 a 3.3.4. Luego se proseguió a calcular la magnitud de estos torques y sumarlos para obtener la magnitud del torque total en el satélite. Con el torque total se calculó la aceleración angular simulada y esta fue comparada con la aceleración angular experimental promedio (asumiendo aceleración constante) y la velocidad angular experimental del satélite. Cabe mencionar que los datos de los torques, las aceleraciones y la velocidad angular fueron suavizados por medio de una media movil con una ventana de 21 datos para los giroscopios y una ventana de 50 datos para los torques, definida por Aguilar [3]. Los resultados de este programa se pueden observar en las Figuras 4.2 y 4.3.

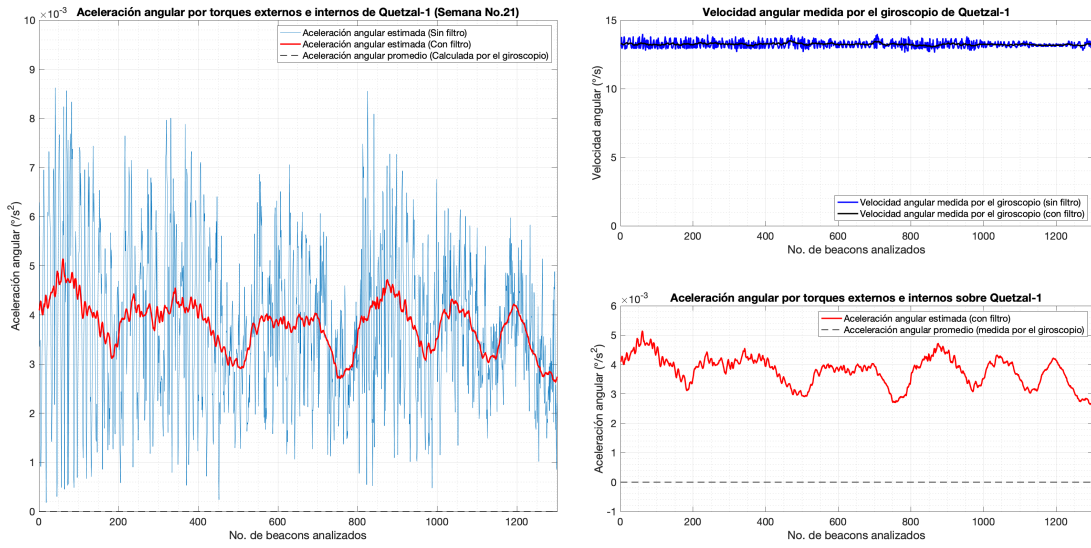


Figura 4.2: Gráficas de aceleración angular y velocidad angular de la semana 21 desde el lanzamiento del satélite, obtenidas con el programa del anexo A.1.

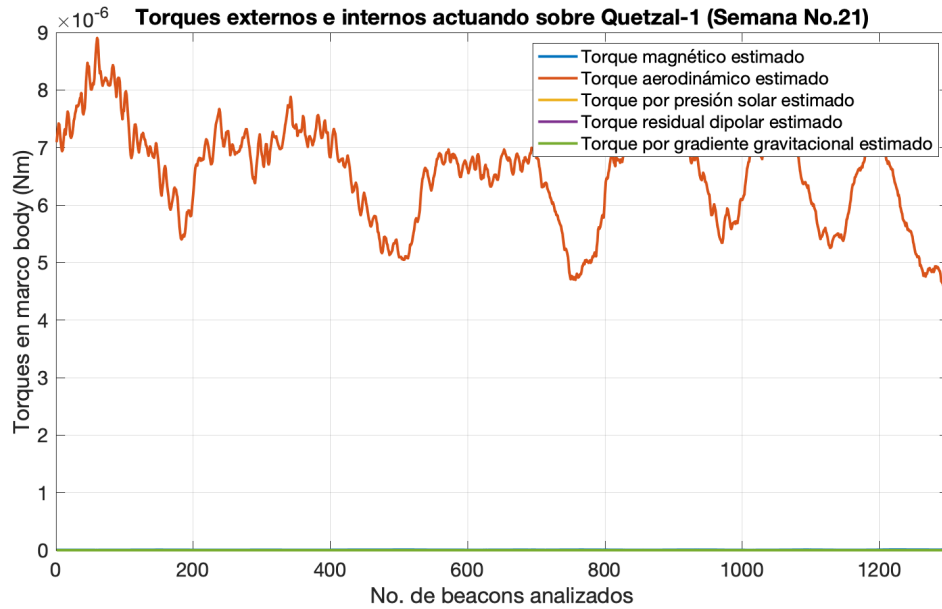


Figura 4.3: Gráfica de torques externos de la semana 21 desde el lanzamiento del satélite, obtenidas con el programa del anexo A.1.

Tabla 4.2: Parámetros para la función *CubeSatDisturbanceAnalysis.m*<sup>†</sup>

Parámetro	Definición	Valor (si es que tiene)
d	Es una estructura que almacena datos acerca del satélite. En este caso, del Quetzal-1	
d.mass	Es la masa del satélite	1.040 <i>kg</i>
d.inertia	Matriz de inercia del satélite	[0.001816 0 0; 0 0.001882 0; 0 0 0.001621] <i>kg · m<sup>2</sup></i>
d.cM	Offset de centro de masa de Quetzal-1 respecto a su centro geométrico	[0.067e-3; -1.577e-3; 2.509e-3] <i>m</i>
[a,n,rr]	Selección de modelo de CubeSat '1U'	CubeSatFaces('1U')
d.nFace	Vectores normales con respecto a cada cara	n
d.area	Area de cada cara	a
d.cD	Coefficiente de arrastre del Quetzal-1	2.4
d.dipole	Dipolo residual del satélite. Se asume que no hay.	[0;0;0]
d.skewOmegaEarth	Velocidad angular de Tierra.	Skew2([0;0;7.291e-5])
pp	Paneles solares en todas las caras de Quetzal-1.	{'solar panel' 'solar panel' 'solar panel' 'solar panel' 'solar panel' 'solar panel'}
d.optical	Determinar propiedades ópticas de paneles.	OpticalSurfaceProperties(pp)
d.att	Actitud del satélite Quetzal-1.	CubeSatAttitude
planet	Planeta en el que se encuentra el satélite Quetzal-1. planet = 1 → Tierra	1
q	Cuaterniones a utilizar para realizar la transformación de ECI a Body y viceversa, para el satélite Quetzal-1.	
r	Vector de posiciones del satélite Quetzal-1.	
v	Vector de velocidades del satélite Quetzal-1.	
jD	Vector de fecha Juliana	

<sup>†</sup>Los parámetros de la estructura d fueron obtenidos del programa del autor [3]

Para la realización de un análisis de torques externos se utilizó el programa *Quetzal1\_Disturbance\_Analyzer.m* del autor [3]. De este se obtuvieron las Figuras 4.2 y 4.3, las cuáles aportaban información acerca de la magnitud de los torques simulados, la aceleración simulada, la velocidad angular experimental y el promedio de la aceleración angular experimental. Al mismo tiempo, estas gráficas aportaron la misma información pero con los datos suavizados.

Dado que las magnitudes de los torques eran positivas, la aceleración calculada era aceleración positiva, por lo que se prosiguió a descomponer los torques para poder realizar un análisis por componentes. Por otro lado, se calcularon los torques magnéticos reales que generaba el satélite debido a su sistema de control pasivo magnético. Para esto fue utilizada la variable del flujo de campo magnético de la Tierra, la cuál fue calculada mediante el sensor de magnetómetro del satélite Quetzal-1, que también fue suavizada. Cabe mencionar que la variable del flujo de campo magnético de la Tierra fue convertida a una variable de campo magnético, tal que

$$H_a = \frac{B_a}{\mu_0} \quad (5.1)$$

Donde  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío.

Para modelar el torque magnético debido a las barras de histéresis fue necesario calcular el momento magnético de las mismas.

## 5.1. Modelo de tangente inversa para las curvas de histéresis

Para el cálculo del momento magnético en las barras histéresis fue necesario calcular la densidad de flujo de campo magnético generado por el campo magnético inducido en ellas. En el trabajo de Dahl [5] se presenta el modelo de Flatley [5] para el modelaje de las curvas de histéresis. Sin embargo, en este mismo trabajo, Dahl muestra cómo modelar las curvas de histéresis por medio del modelo de tangente inversa, dada por la ecuación [5]

$$B(H) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} B_s \tan^{-1} [k(H - H_c)] & \text{frontera derecha} \\ \frac{2}{\pi} B_s \tan^{-1} [k(H + H_c)] & \text{frontera izquierda} \end{cases} \quad (5.2)$$

En la ecuación 5.2,  $B(H)$  es la densidad de flujo de campo magnético generado en las barras de histéresis dependiente del campo magnético inducido en ellas (variable dependiente),  $H$  es el campo magnético inducido (la variable independiente),  $B_s$  es la saturación del material ferromagnético,  $k$  es una constante y  $H_c$  es el campo coercitivo.

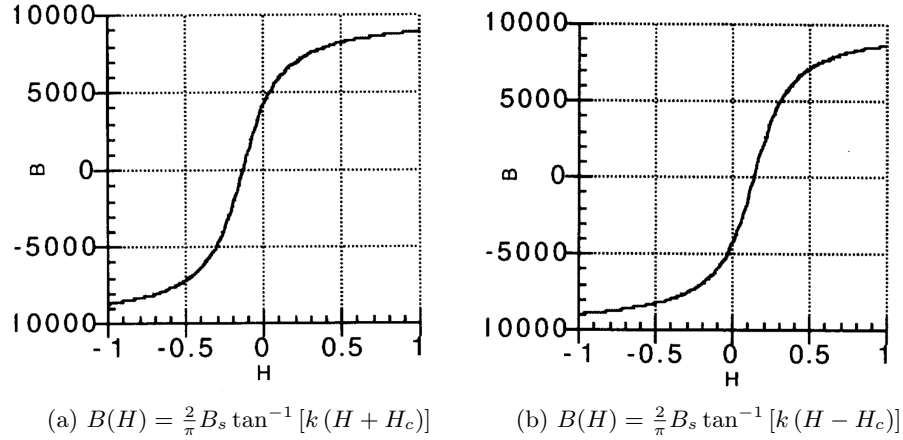


Figura 5.1: Curvas de histéresis según modelo de tangente inversa [5]

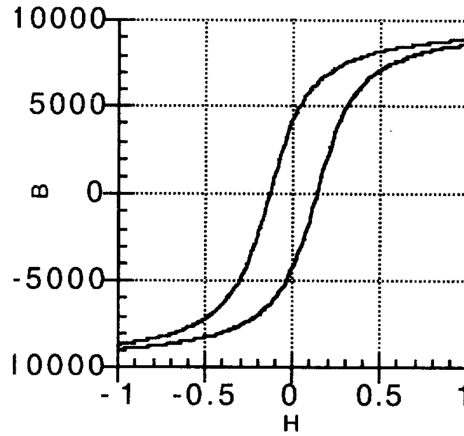


Figura 5.2: Superposición de la Figura 5.1a y la Figura 5.1b [5].

La constante  $k$  se calcula cuando  $H = 0$ . Se tiene que

$$B_r = \frac{2}{\pi} B_s \tan^{-1} [k(H_c)] \quad (5.3)$$

Donde  $B_r$  es la remanencia del material ferromagnético y el intersepto con el eje de las ordenadas, cuando  $H = 0$ . Despejando para  $k$  tenemos que

$$k = \frac{1}{H_c} \tan \left( \frac{\pi B_r}{2 B_s} \right) \quad (5.4)$$

Para determinar si la densidad de flujo de campo magnético  $B(H)$  se encuentra en la frontera izquierda o en la frontera derecha de la curva (observar Figura 5.2) se utilizó el siguiente criterio:

1. Asumir que se empieza en la frontera derecha como posición inicial.
2. Si al evaluar la ecuación 5.2, para la frontera derecha, el resultado del flujo de campo magnético de las barras es mayor o igual a  $B_s$ , el flujo de campo magnético será determinado por la ecuación 5.2 para la frontera izquierda. De lo contrario, la densidad de flujo de campo magnético será determinada por la ecuación 5.2 para la frontera derecha.
3. Si al evaluar la ecuación 5.2, para la frontera izquierda, el resultado del flujo de campo magnético de las barras es menor o igual a  $-B_s$ , el flujo de campo magnético será determinado por la ecuación 5.2 para la frontera derecha. De lo contrario, la densidad de flujo de campo magnético será determinada por la ecuación 5.2 para la frontera izquierda.

Por otro lado, se obtuvo la curva de histéresis del satélite a partir del mismo modelo de tangente inversa. Para esto se siguió el mismo procedimiento que se explica al principio de esta sección pero con un cambio en el vector del campo magnético inducido. El cambio realizado fue un ordenamiento del vector  $\mathbf{H}_a$  de menor a mayor para poder obtener el incremento de la curva. Realizando este cambio, al graficar la curva de histéresis, no es posible decir que cada punto en la gráfica está relacionado con la posición exacta en cada tiempo del satélite. Esta gráfica es utilizada para poder observar la magnetización general del satélite en la semana analizada. Ambos procesos fueron realizados en el programa en el anexo A.2.

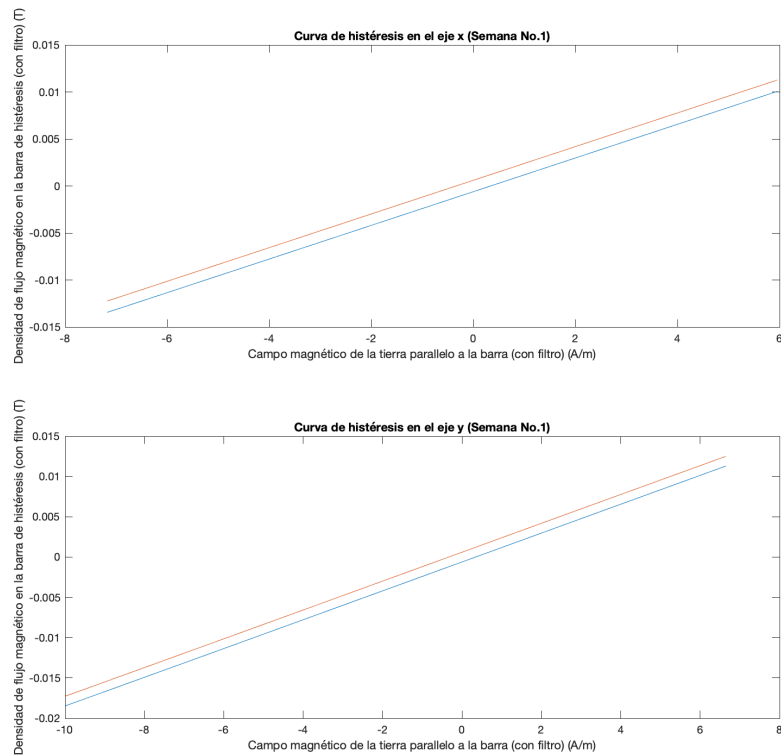


Figura 5.3: Modelo de tangente inversa para curva de histéresis en el eje  $x$  y eje  $y$  para la primera semana en orbita del satélite Quetzal-1 antes de estabilización de actitud. La cota superior se muestra de color naranja y la cota inferior se muestra de color azul.

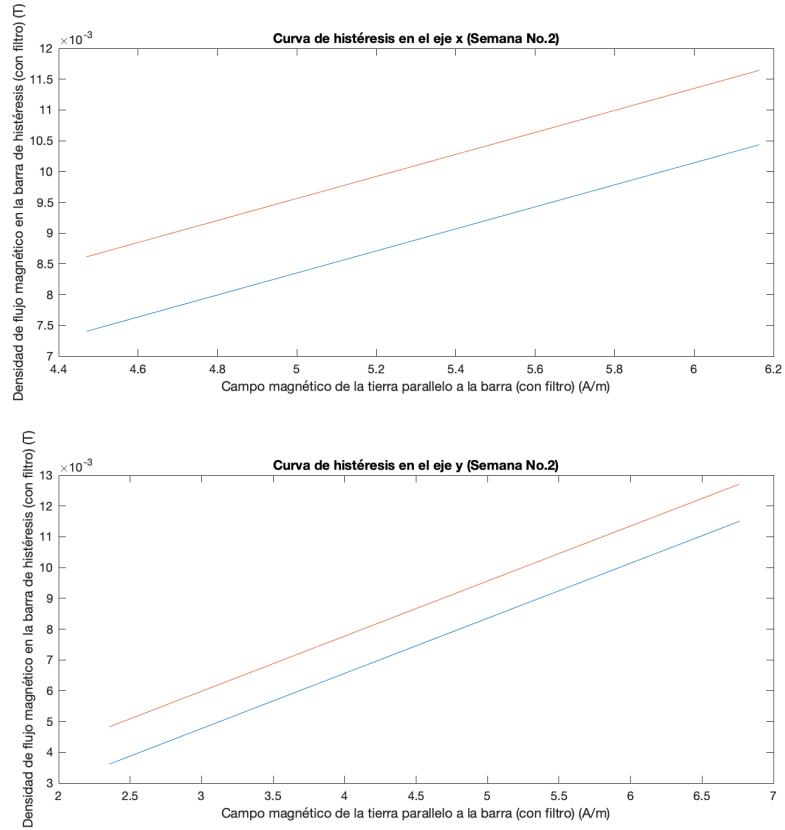


Figura 5.4: Modelo de tangente inversa para curva de histéresis en el eje  $x$  y eje  $y$  para la segunda semana en órbita del satélite Quetzal-1 después de estabilización de actitud. La cota superior se muestra de color naranja y la cota inferior se muestra de color azul.

Cabe mencionar que el modelo de tangente inversa no genera curvas iguales a la Figura 5.2. Esto concuerda con las gráficas de Gerhardt [6] para su satélite CSSWE que se observan en la Figura 5.5. Por otro lado, las magnitudes del flujo de campo magnético de la Figura 5.3 y Figura 5.4 concuerdan con las magnitudes de las curvas antes de estabilizarse, Figura 5.5 (gráfica superior), y las curvas después de estabilizarse, Figura 5.5 (gráfica inferior).

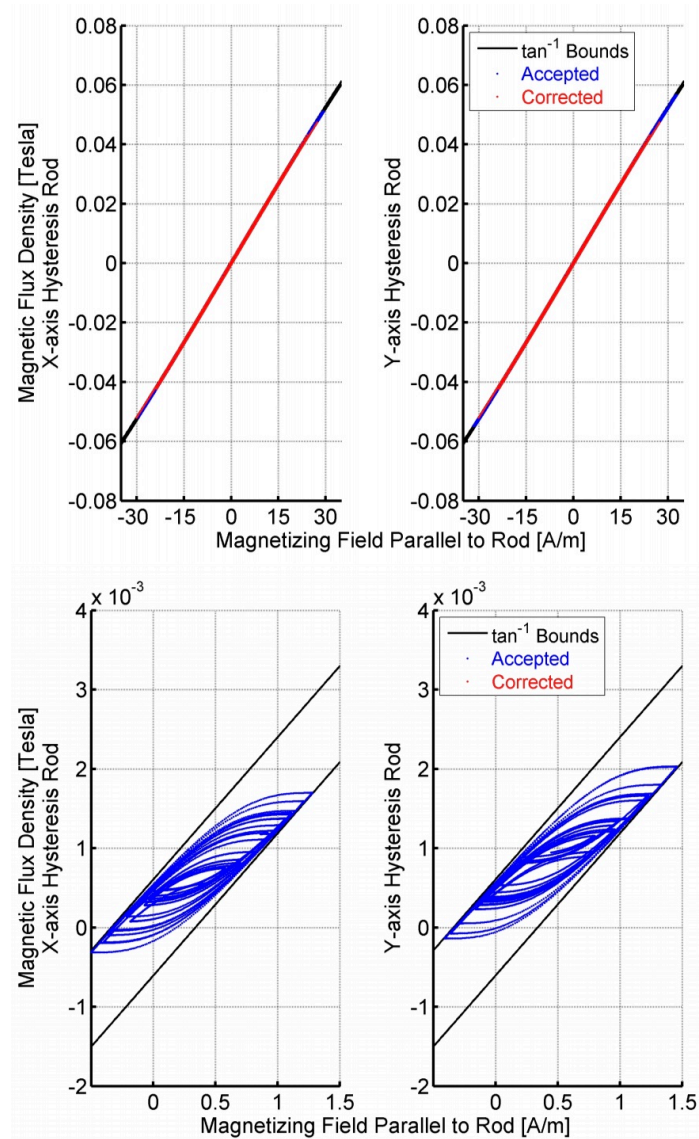


Figura 5.5: Simulación para una órbita de la curva de histéresis del eje  $x$  y  $y$  antes (arriba) y después (abajo) que la actitud se estabilice. Las cotas son dadas por el modelo de tangente inversa y las curvas de histéresis son dadas por el modelo de Flatley. La magnetización que ha sido corregida permanece dentro de las cotas y estas son mostradas en rojo; los otros datos son mostradas en azul [7].

## 5.2. Correlación de velocidades angulares y normalidad de densidad de campo magnético generado por barras de histéresis

Para determinar la correlación de las velocidades angulares, se comenzó determinando si los vectores de velocidad angular seguían una distribución normal. Para esto se hizo uso de la función de *MATLAB*, *jbtest()*. Esta función realiza una prueba «Jarque-Bera test» para determinar si una distribución es normal. La prueba toma como hipótesis nula que la distribución es normal y como

hipótesis alternativa que la distribución no es normal. Si no se rechaza la hipótesis nula, la función devuelve un «0» como resultado, de lo contrario devuelve un «1», *i.e.*, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa. La prueba trabaja con un 95 % de confiabilidad [2].

Una vez determinada la distribución de las velocidades angulares, se prosiguió a realizar una prueba de correlación de la velocidad angular en el eje  $x$  con la velocidad angular en el eje  $z$  y la velocidad angular en el eje  $y$  con la velocidad angular en el eje  $z$ . La correlación fue obtenida por medio de la función de *MATLAB*, *corrcoef()*. Esta función genera los coeficientes de correlación entre dos variables. Por otro lado, esta devuelve el valor  $p$  de la correlación. Como hipótesis nula se tiene que no hay relación entre las variables y como hipótesis alternativa se tiene que existe relación entre las variables. La prueba trabaja con un 95 % de confiabilidad [1].

Cabe mencionar que se realizó la prueba de Jarque-Bera para determinar si las densidades de flujo magnético generadas por las barras de histéresis seguían una distribución normal, para poder realizar pruebas de correlación con la velocidad angular en el eje  $z$ .

### 5.3. Cálculo de energías

Se generó un gráfico de comparación de energías, dado que según [7] el momento magnético del imán permanente está relacionada a la energía inicial del satélite al momento de ser lanzado. La energía rotacional puede ser dividida en la energía potencial magnética del satélite y la energía cinética rotacional del satélite. Gerhardt [7] define estas energías como

$$T_K = \frac{1}{2}w^T[I]w \quad (5.5)$$

$$T_P = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B} \quad (5.6)$$

Donde  $T_K$  es la energía cinética rotacional y  $T_P$  es la energía potencial rotacional. Para la ecuación 5.5  $w$  es el vector de velocidad angular e  $I$  es la matriz de inercia del satélite (ver ecuación 3.17). Por otro lado, para la ecuación 5.6  $\mathbf{m}$  es el vector de momento angular magnético y  $\mathbf{B}$  es el vector del flujo de campo magnético.

### 5.4. Cálculo del ángulo entre el eje $z$ y el campo magnético

Se calculó el ángulo entre el eje  $z$  y el flujo campo magnético de la Tierra. Este fue calculado con la función de *MATLAB*, *atan2d()* llamada «four-quadrant inverse tangent». Se partió del mismo código utilizado por Aguilar [3]. El ángulo fue utilizado para encontrar el ángulo entre el campo magnético de la Tierra con el eje  $z$ , y graficarlo en función de la latitud y longitud. El código para realizar dicha gráfica fue tomado de Aguilar[3] del programa *Quetzal1\_Attitude\_Analyzer.m*.

### 5.5. Análisis estadístico semanal

Se modificó el código del anexo A.1. El código agregado calculó el promedio y desviación estándar de las variables que se muestran en la Tabla 5.1 y estas fueron almacenadas en una hoja de cálculo. Los promedios fueron calculados por medio de la función de *MATLAB*, *mean()* y la desviaciones estándar fueron calculadas por medio de la función de *MATLAB*, *std()*.

Tabla 5.1: Parámetros del sistema magnético pasivo.<sup>†</sup>

Variable	Prueba de normalidad	Correlación con $w_z$	Valor p de la correlación	Promedio	Desviación estándar
Velocidad angular en el eje $x$	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Velocidad angular en el eje $y$	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Velocidad angular en el eje $z$	Sí	No	No	Sí	Sí
Aceleración angular constante en el eje $z$	No	No	No	Sí <sup>†</sup>	No
Flujo magnético de barras en el eje $x$	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Flujo magnético de barras en el eje $y$	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

<sup>†</sup>Este promedio fue calculado de la misma manera en que Aguilar [3] calcula la magnitud de aceleración en el programa *Quetzal1\_Disturbance\_Analyzer.m*

A partir de estos datos y del programa *Quetzal1\_Disturbance\_Mean\_Analyzer.m*, se realizaron dos gráficas para analizar la densidad de flujo de campo magnético promedio generado por las barras en el eje  $x$  y eje  $y$  a lo largo de las semanas en órbita del satélite. Cabe mencionar que el análisis de estas gráficas se comenzó a partir de la semana en la que el satélite se estabilizó, *i.e.*, la semana 2. Por otro lado, cada punto de la semana se coloreo dependiendo de la aceleración (asumida constante) observada esa semana. Esto fue realizado por medio de un mapa de color en *MATLAB*. El código para realizar el mapa de color fue tomado de Aguilar [3] y fue editado para pintar conforme la aceleración en el eje  $z$ .

Seguidamente, se prosiguió a realizar dos gráficas para analizar la velocidad angular promedio en el eje  $x$  y el eje  $y$  a lo largo de las semanas en órbita del satélite. Nuevamente, se comenzó desde la semana de estabilización del satélite, *i.e.*, la semana 2. Cada punto de la semana se coloreo dependiendo de la aceleración en el eje  $z$  observada en esa semana.

Este capítulo habla acerca de los resultados obtenidos a partir de la modificación del código de Aguilar [3] (anexo A.1). Por otro lado, se mostrarán los resultados de los códigos para el anexo A.2 y el anexo A.3.

### **6.1. Satélite Quetzal-1 - Semana 1 en órbita**

#### **6.1.1. Torques externos e internos por componentes**

Se obtuvieron los torques que afectaban en cada eje del sistema de referencia Body del satélite Quetzal-1.

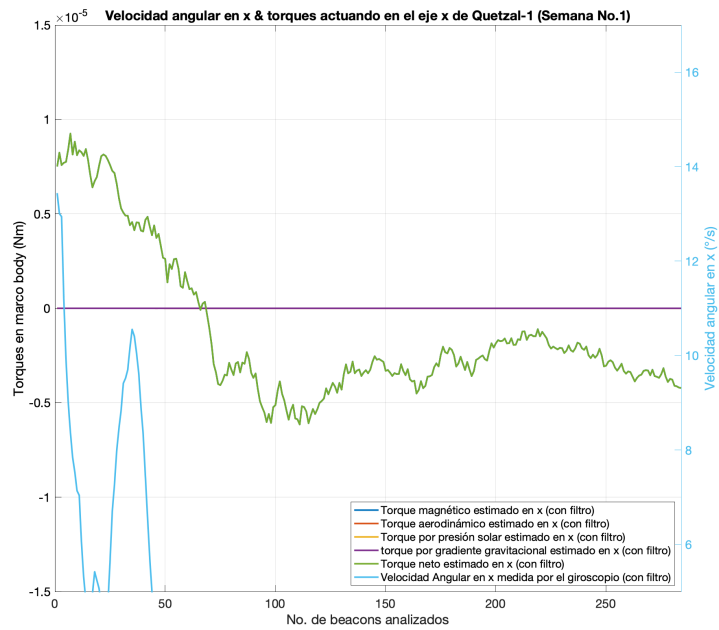


Figura 6.1: Comparación de torques externos e internos en el eje  $x$  contra la velocidad angular  $w$  en el eje  $x$

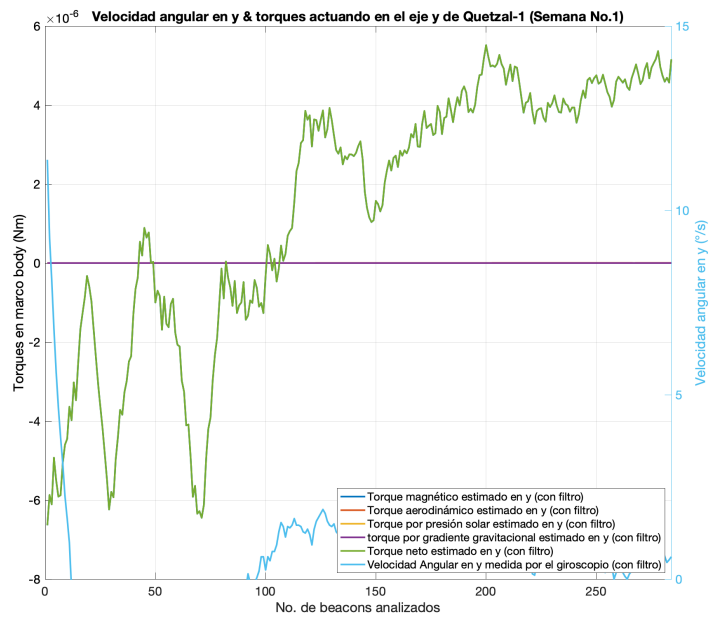


Figura 6.2: Comparación de torques externos e internos e internos en el eje  $y$  contra la velocidad angular  $w$  en el eje  $y$

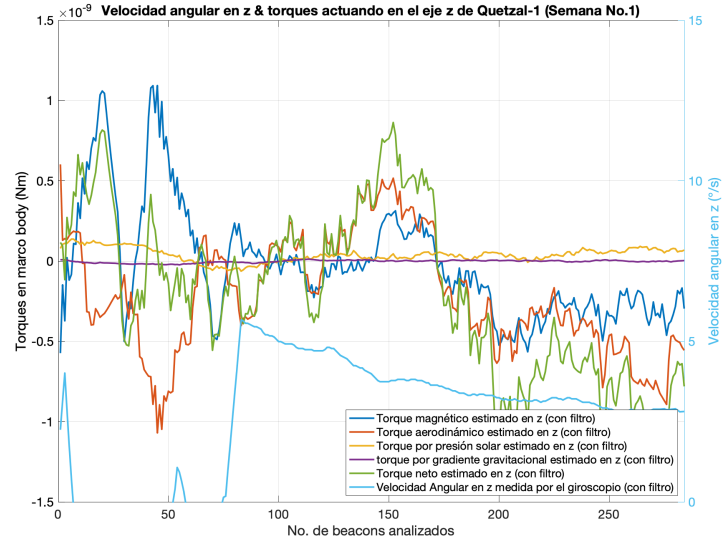


Figura 6.3: Comparación de torques externos e internos en el eje  $z$  contra la velocidad angular  $w$  en el eje  $z$

En las Figuras 6.1 y 6.2 se observa que el único torque es el torque neto. Esto se debe a que el torque neto está sobrepuesto con el torque magnético. Los demás torques analizados no se observan en estas Figuras debido a que su magnitud es demasiado pequeña a comparación de la magnitud del torque magnético. Por otro lado, en la Figura 6.3 se observa que los torques dominantes son el torque aerodinámico y el torque magnético debido a las barras de histéresis. Cabe mencionar que en las siguientes semanas, el torque magnético debido a las barras de histéresis disminuye a una magnitud similar a los torques por gradiente gravitacional y presión solar.

### 6.1.2. Velocidades angulares

Se obtuvieron las gráficas de las velocidades angulares utilizando las mediciones del giroscopio del Quetzal-1. En la Figura 6.4 se observa como las velocidades se estabilizan a lo largo de la primera semana, por lo que se puede decir que el sistema de control pasivo magnético pudo alinear al satélite con el campo magnético de la Tierra.

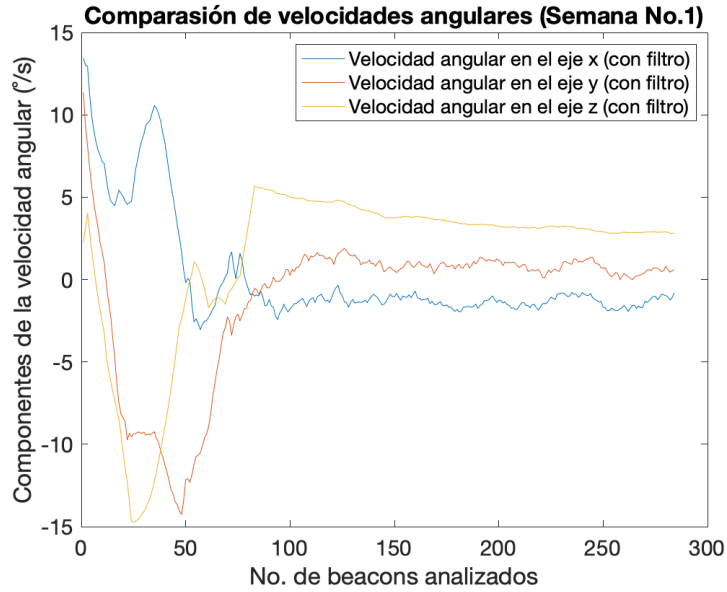


Figura 6.4: Comparación de velocidades angulares en los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$

### 6.1.3. Energía rotacional

A partir de las ecuaciones 5.5 y 5.6 se obtuvieron las gráficas para las energías cinéticas y potenciales rotacionales de la semana 1. Se observa que la energía cinética rotacional disminuye conforme el tiempo pasa. Por otro lado, la energía potencial rotacional se mantiene en 0.

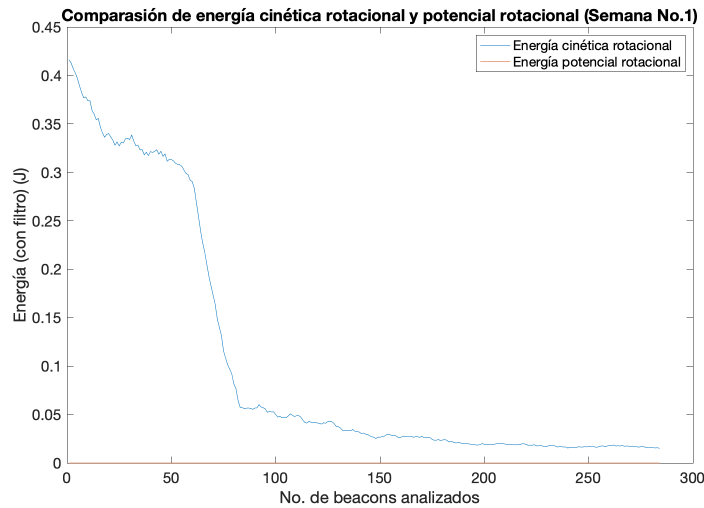


Figura 6.5: Energía cinética rotacional y energía potencial rotacional para la primera semana en órbita del satélite Quetzal-1.

### 6.1.4. Componente de campo magnético en $z$ y velocidad angular en $z$

Se obtuvieron dos gráficas para comparar la cantidad de campo magnético en su componente en  $z$  con la velocidad angular  $w$  en  $z$ . Se observó, en la Figura 6.7, que para la semana 1 no parece haber una correlación con la cantidad de campo magnético en el eje  $z$  y la velocidad angular en el eje  $z$ .

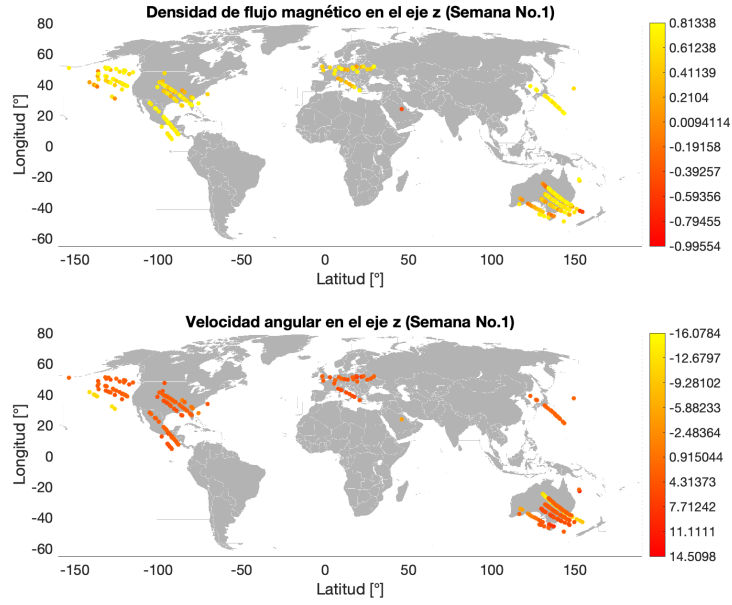


Figura 6.6: Gráfica de latitud con longitud donde los puntos están coloreados con respecto al campo magnético  $mT$  (arriba) y gráfica de latitud con longitud donde los puntos están coloreados con respecto a la velocidad angular en el eje  $z$   $^{\circ}/s$ . Los datos del campo magnético están normalizados.

### 6.1.5. Fronteras de la curva de histéresis

El cálculo de la razón entre la longitud de las barras de histéresis con su diámetro fue de

$$\frac{95 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} = 95 > 30 \quad (6.1)$$

Por lo que se utilizó ecuación 3.24 para el modelo de momento magnético de las barras de histéresis. Por otro lado, se obtuvo una gráfica de los bordes o fronteras de la curva de histéresis con el modelo de tangente inversa.

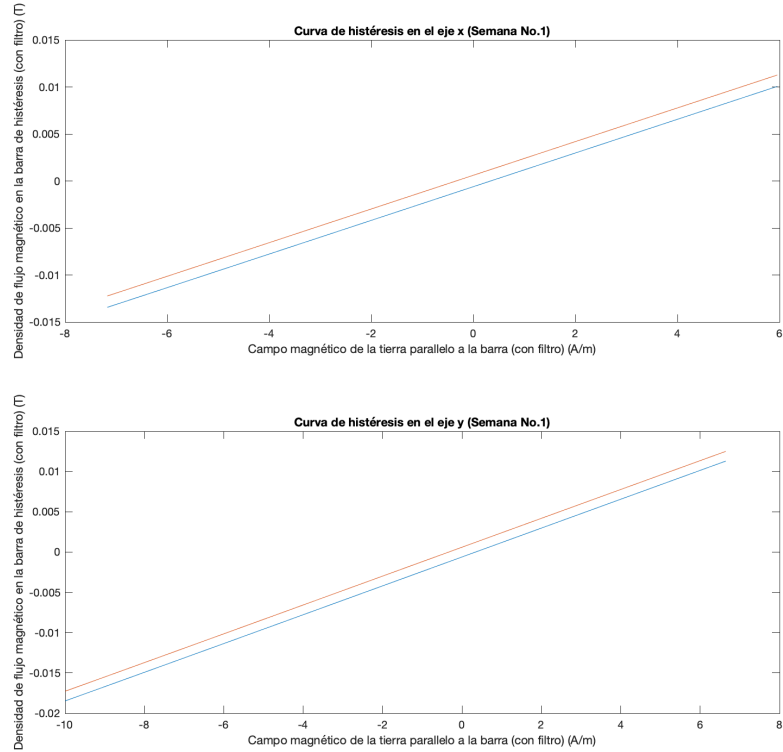


Figura 6.7: Comparación en mapamundi de campo magnético en el eje z y velocidad angular  $w$  en el eje z

La semana 1 fue la semana con más variación en la densidad de flujo magnético en las barras. Esto se debe a que el satélite tuvo oscilaciones muy grandes, y la variación de las barras en el campo magnético provocaron que estas se magnetizaran más comparado con la semana 2 en adelante (cuando el satélite alcanzó estabilidad).

## 6.2. Satélite Quetzal-1 - 21 semanas en órbita

Los gráficos presentados en esta sección contienen los datos de las 21 semanas en órbita del satélite Quetzal-1.

### 6.2.1. Torques externos e internos

Se obtuvieron los torques que afectaban en cada eje del sistema de referencia Body.

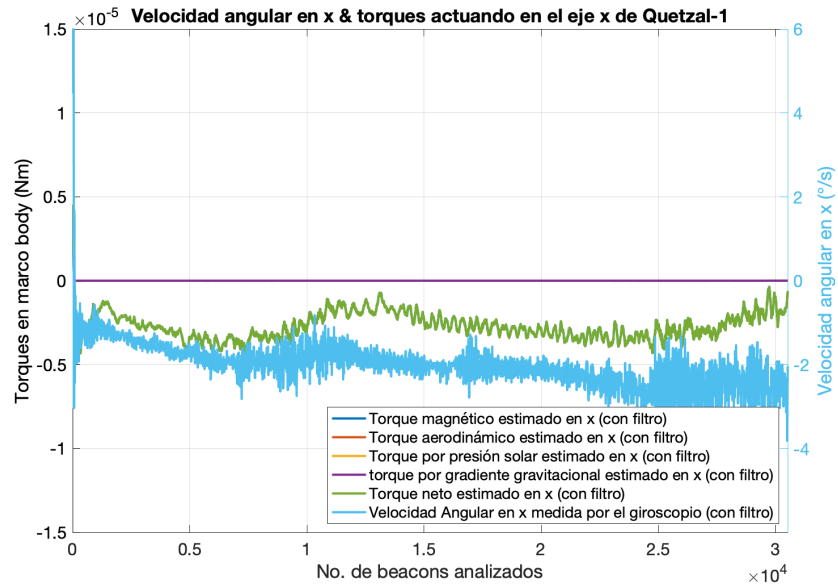


Figura 6.8: Comparación de torques externos e internos en el eje  $x$  contra la velocidad angular  $w$  en el eje  $x$

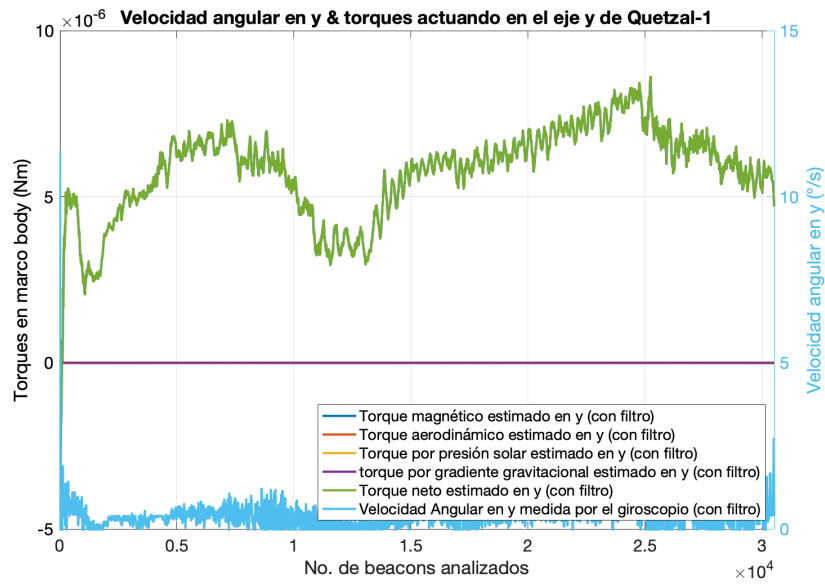


Figura 6.9: Comparación de torques externos e internos en el eje  $y$  contra la velocidad angular  $w$  en el eje  $y$

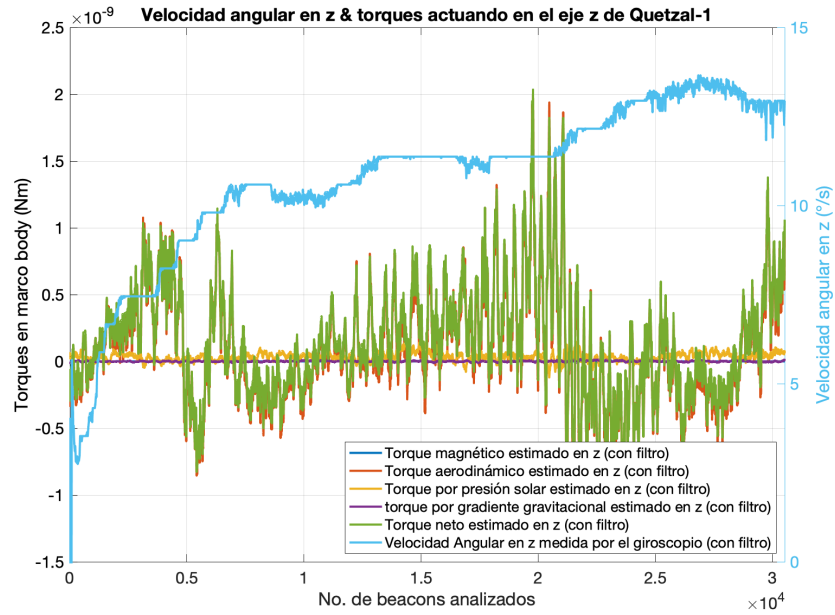


Figura 6.10: Comparación de torques externos e internos en el eje z contra la velocidad angular  $w$  en el eje z

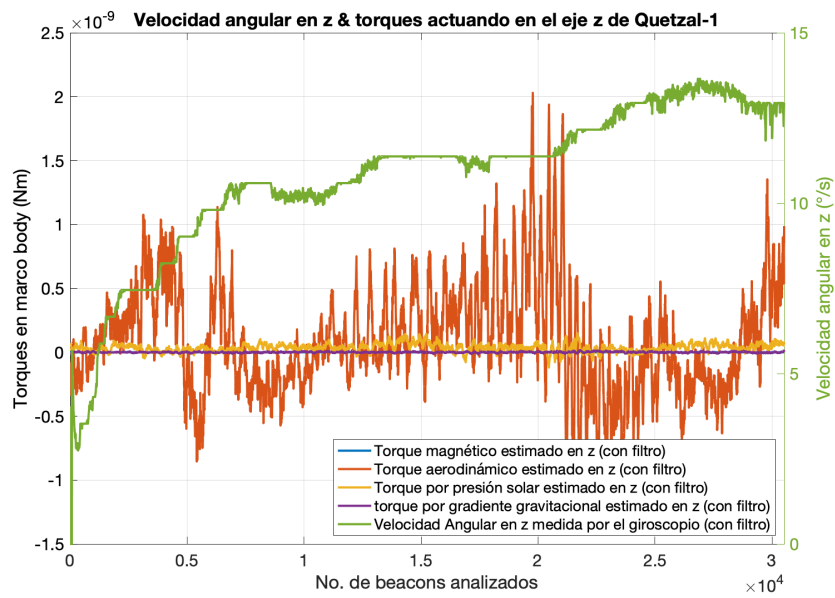


Figura 6.11: Comparación de torques externos e internos en el eje z contra la velocidad angular  $w$  en el eje z, sin torque neto.

Como se observa en las Figuras 6.8 y 6.9, el torque dominante en el eje  $x$  y  $y$  fue el torque magnético, el cual se encuentra traslapado con el torque neto del satélite. Por otro lado, el torque dominante en el eje  $z$ , según la Figura 6.10, fue el torque aerodinámico. Sin embargo, este torque fue simulado y, a lo largo de las semanas, no se logra observar alguna relación de este con el aumento de velocidad angular en el eje  $z$ . Para la Figura 6.10 no se graficó el torque magnético por las barras

de histéresis debido a que este es de la misma magnitud que el torque de gradiente gravitacional y presión solar. Por otro lado, graficar el torque magnético por las barras de histéresis para los datos de todas las semanas en un solo gráfico, no aportaba ninguna información adicional de manera clara. Finalmente, el torque aerodinámico en la Figura 6.10 no se observa debido al torque neto, por lo que se graficó la Figura 6.11 para poder observar el torque aerodinámico.

### 6.2.2. Velocidades angulares

Se obtuvieron las gráficas de las velocidades angulares. Como se observa en la Figura 6.12, conforme avanzaron las semanas en órbita del satélite, la velocidad angular en  $z$  fue aumentando considerablemente. Por otro lado, se observó que cuando la velocidad angular en  $x$  y en  $y$  oscilaba, la velocidad en  $z$  intentaba disminuir o se mantenía estable. Esto es parecido a lo que sucedió en la semana 1, pero debido a que la variación en las oscilaciones no era tan grande, el satélite no pudo volver a disminuir sus oscilaciones en el eje  $z$ . Cabe mencionar que las oscilaciones provocan variaciones en el campo magnético inducido en las barras, por lo que estas tienden a magnetizarse y desmagnetizarse. Esto provoca calor en las barras que es utilizado como un amortiguador en las oscilaciones de todos los ejes.

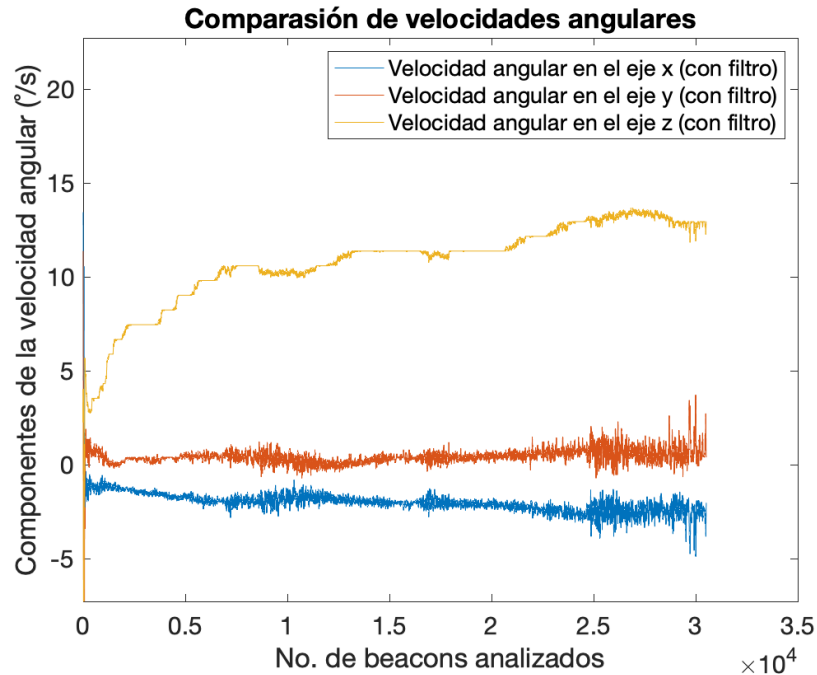


Figura 6.12: Comparación de velocidades angulares en los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$

### 6.3. Pruebas de normalidad y correlación con la velocidad angular en el eje $z$

Se obtuvieron las pruebas de normalidad y de correlación para las variables mencionadas en la Tabla 5.1. Nuevamente, para las pruebas de normalidad, el valor 1 significa que los datos no siguen una distribución normal. Por otro lado, el valor 0 significa que los datos siguen una distribución normal. Los resultados pueden ser observados en la Tabla 6.1. Como se observa en esta Tabla, la mayoría de datos no siguen una distribución normal, es por eso que no es posible utilizar la correlación

de estos datos con la velocidad angular en el eje  $z$ . Sin embargo, de ser posible utilizar la correlación, se podría decir que las velocidades angulares en los ejes  $x$  y  $y$  están relacionadas con la velocidad angular en el eje  $z$  del satélite Quetzal-1. Cabe mencionar que, la prueba de normalidad utilizada, toma en consideración que los datos no estén centrados en 0. Esto elimina la necesidad de conocer donde están centrados los datos.

## 6.4. Satélite Quetzal-1 - Resumen de datos

Las graficas presentadas en esta sección inician desde la semana en la que el satélite Quetzal-1 alcanzó estabilización, *i.e.*, la semana 2. Esto se debe a que se desea partir desde el punto de control del satélite.

### 6.4.1. Velocidades angulares

Se obtuvieron dos gráficos utilizando los promedios de las velocidades angulares en el eje  $x$  y  $y$  a lo largo de las semanas en órbita del satélite Quetzal-1. Las barras de error son la desviación estándar de esa semana. Los promedios de cada semana están coloreados con respecto a la magnitud de aceleración angular constante en el eje  $z$  para esa semana.

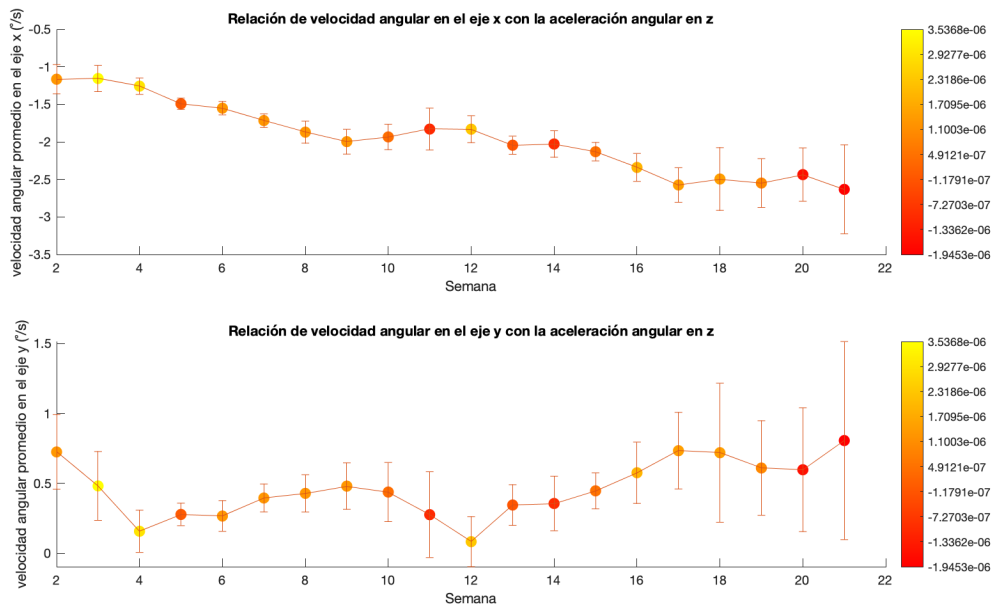


Figura 6.13: Gráfica de semanas del satélite Quetzal-1 con la velocidad angular en el eje  $x$ , donde los puntos están coloreados con respecto a la aceleración constante en el eje  $z$   $^{\circ}/s^2$  (arriba) y gráfica de semanas del satélite Quetzal-1 con la velocidad angular en el eje  $y$ , donde los puntos están coloreados con respecto a la aceleración constante en el eje  $z$   $^{\circ}/s^2$  (abajo).

Como se observa en la Figura 6.13, la gráfica de la velocidad angular en el eje  $x$  tiene una velocidad angular estable durante las semanas 2 - 4, y en estas semanas, la aceleración angular en el eje  $z$  se mantiene alta (entre un color naranja claro y amarillo). Cuando la velocidad angular disminuye (aumentar de manera negativa) la aceleración angular disminuye y tiende a 0 o a desacelerar. Por

otro lado, la gráfica de la velocidad angular en el eje  $y$  tiene una velocidad angular que disminuye y tiende a 0 durante las semanas 2 -4. En estas semanas la aceleración angular en el eje  $z$  se mantiene alta. Cuando la velocidad angular en el eje  $y$  aumenta y a ser mayor de 0, la aceleración disminuye. Cabe mencionar que se observa que la velocidad angular en  $x$  tiene mayor influencia en la aceleración angular en  $z$  que la velocidad angular en  $y$ . Por otro lado, la magnitud de velocidad angular en  $x$  es mayor a la magnitud de velocidad angular en  $y$ . A lo largo de las semanas, la velocidad angular en  $x$  tiende a  $-2$  °/s y la velocidad angular en  $y$  oscila entre  $(1, 0)$  °/s. De estas gráficas se pueden decir dos cosas:

- El aumento (negativo o positivo) en velocidad angular en  $x$  o en  $y$  desaceleran al satélite en el eje  $z$ .
- Velocidades angulares menores a  $1$  °/s tienen poco efecto en la desaceleración del satélite en el eje  $z$ .

#### 6.4.2. Densidad de flujo magnético promedio de barras de histéresis

Se obtuvieron dos graficos utilizando los promedios de las densidades de flujo magnético de las barras de histéresis en el eje  $x$  y  $y$  a lo largo de las semanas en órbita del satélite Quetzal-1. Las barras de error son la desviación estándar de esa semana. Los promedios de cada semana están coloreados con respecto a la magnitud de aceleración angular constante en el eje  $z$  para esa semana.

Como se observa en la Figura 6.14, cuando la densidad de flujo magnético promedio en el eje  $x$  disminuye, la aceleración angular en el eje  $z$  aumenta. Se observa que esta tiene el mismo comportamiento que la velocidad angular en el eje  $x$ . Por otro lado, se observa lo mismo para la gráfica de densidad de flujo magnético promedio en el eje  $y$ . Sin embargo, nuevamente se observa que el eje con mayor influencia es el eje  $x$ . Esto puede ser debido a que en este eje hubo una mayor velocidad angular que en el eje  $y$ .

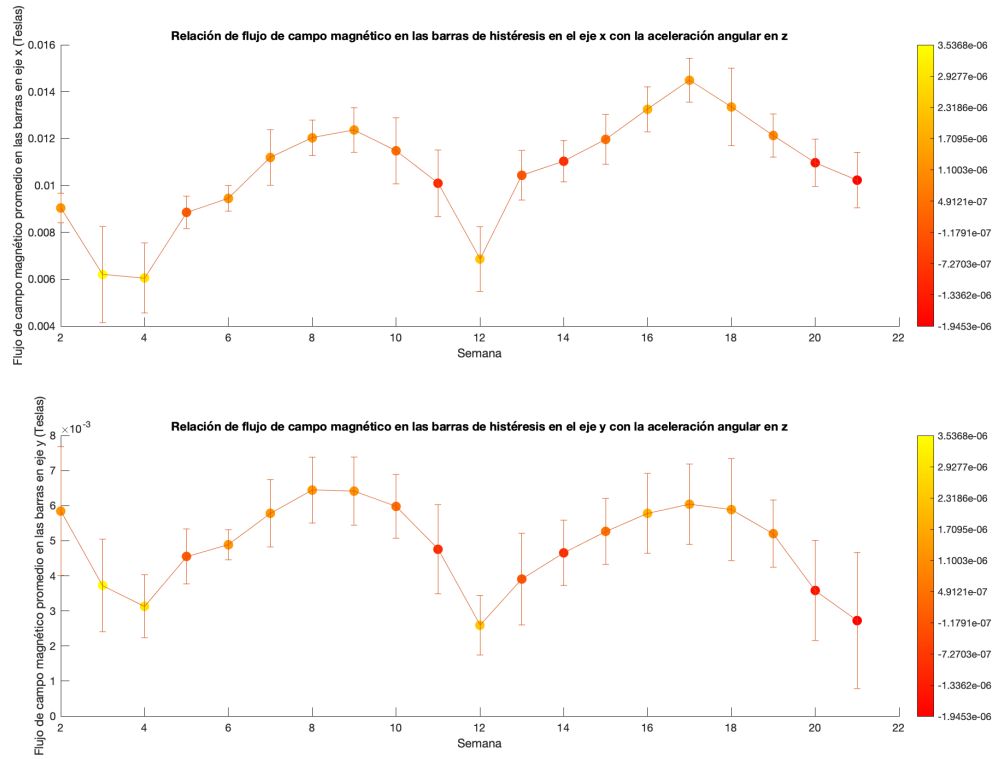


Figura 6.14: Gráfica de semanas del satélite Quetzal-1 con la densidad de flujo magnético generado en la barra de histéresis del eje  $x$ , donde los puntos están coloreados con respecto a la aceleración constante en el eje  $z$   $^{\circ}/s^2$  (arriba) y gráfica de semanas del satélite Quetzal-1 con la densidad de flujo magnético generado en la barra de histéresis del eje  $y$ , donde los puntos están coloreados con respecto a la aceleración constante en el eje  $z$   $^{\circ}/s^2$  (abajo).

Tabla 6.1: Parámetros del sistema magnético pasivo.<sup>†</sup>

Semana	$w_x$ - Prueba de normalidad	Correlación	$w_y$ - Prueba de normalidad	Correlación	$B_x$ por barras - Prueba de normalidad	$B_y$ por barras - Prueba de normalidad
1	1	-0.75	1	0.75	1	1
2	1	-0.22	1	-0.05	0	1
3	0	0.20	1	-0.66	1	1
4	1	-0.59	1	0.73	1	1
5	1	0.00	1	0.00	1	1
6	1	-0.34	1	0.58	1	1
7	1	-0.11	1	0.46	1	1
8	1	-0.35	0	0.07	1	1
9	1	0.11	1	-0.05	1	1
10	0	0.29	1	-0.18	1	1
11	1	0.50	1	0.22	1	1
12	1	-0.43	1	0.16	1	1
13	1	-0.13	1	0.13	1	1
14	1	0.05	1	0.13	1	1
15	1	-0.20	1	0.27	1	1
16	1	-0.33	1	0.20	1	1
17	1	0.09	1	0.06	1	1
18	1	0.51	1	-0.01	1	1
19	1	0.57	1	-0.10	1	1
20	1	0.29	1	-0.30	1	1
21	1	0.86	1	-0.79	1	1

El objetivo principal de este trabajo de graduación fue determinar, por medio de un análisis de torques externos, si estos provocan algún efecto cuantificable sobre la velocidad angular en el eje  $z$  del satélite Quetzal-1. Con los resultados obtenidos en el análisis de torques externos se puede mencionar que el torque con mayor influencia en el eje  $z$  del satélite es el torque aerodinámico simulado. Sin embargo, la razón principal de la aceleración del satélite en el eje  $z$  no es este. Por otro lado, los torques por gradiente gravitacional y por presión solar simulados son menores en magnitud al torque aerodinámico simulado, con una diferencia de magnitud de  $10^2$ . Por lo tanto, los torques por gradiente gravitacional y por presión solar simulados se pueden descartar del análisis.

La razón por la cual el torque por gradiente gravitacional es pequeño se debe a la simetría de la matriz de inercia y la posición del centro de masa del satélite. Por otro lado, la razón por la cual el torque por presión solar es pequeño se debe a que el área superficial del satélite es pequeña, dado que el satélite Quetzal-1 es considerado un nanosatélite.

Ahora, como las velocidades angulares del satélite no siguen una distribución normal, no es posible realizar un análisis de correlación entre las velocidades angulares en los ejes  $x$  y  $y$  con la velocidad angular en el eje  $z$ . La razón por la cual estas variables no siguen una distribución normal puede deberse a que los datos del satélite, debido a el filtrado realizado en el programa *Quetzal1\_Disturbance\_Analizer.m*, no son continuos o al menos el espacio entre ellos es demasiado grande. Otra razón por la cual estos no son continuos es debido a la órbita del satélite. Dado que los satélites en órbitas cercanas a la Tierra giran alrededor de ella, los telepuertos o estación de radio terrestre, solo pueden recibir datos de los satélites cuando estos pasan por su campo de visión. Cuando los satélites salen del campo de visión de los telepuertos, ya no se reciben datos del satélite.

Por otro lado, se cumplió el objetivo de detallar posibles causas adicionales para el fenómeno de aceleración en el eje  $z$  del satélite. Se encontró que la disminución de las oscilaciones en los ejes  $x$  y el eje  $y$  del satélite disminuye la amortiguación de las oscilaciones en el eje  $z$  del satélite. Por otro lado, para el sistema de control pasivo magnético, la disipación de energía por calor de las barras depende de las oscilaciones que tenga el satélite en el eje  $x$  y  $y$ . Esto se debe a que las oscilaciones en estos ejes dan lugar a variaciones en el campo magnético inducido en las barras, por lo que se genera la histéresis en ella; es decir, la amortiguación en el sistema. Se puede decir que para el satélite Quetzal-1, entre mayor sea la alineación con el campo magnético y menor sean las oscilaciones en los ejes donde se encuentran las barras de histéresis (eje  $x$  y eje  $y$ ), menos control se tendrá sobre el eje  $z$  del satélite.

En conclusión se puede decir que el torque con mayor influencia en el eje  $z$  del satélite es el torque aerodinámico. Por otro lado, el control del satélite en el eje  $z$  dependerá de la magnitud de las oscilaciones en los ejes donde se encuentran posicionadas las barras de histéresis.

Las conclusiones del análisis realizado para la verificación del efecto de torques externos en la componente en  $z$  de la velocidad angular del satélite Quetzal-1, son:

1. A partir de análisis de la simulación torques externos por componentes, se puede concluir que el torque con mayor influencia en el eje  $z$  del satélite es el torque aerodinámico, descartando así la influencia de torque por gradiente gravitatorio, por presión solar y por torque magnético debido a las barras de histéresis. A pesar de ello, el torque aerodinámico no parece estar relacionado al aumento de velocidad angular en  $z$ .
2. Para el satélite Quetzal-1, debido a las barras de histéresis, entre mayor sea la alineación con el campo magnético y menor sean las oscilaciones en los ejes donde se encuentran las barras de histéresis (eje  $x$  y eje  $y$ ), menor será el control sobre el eje  $z$  del satélite.
3. Los datos de las velocidades angulares y las densidades de flujo magnético generados por las barras de histéresis no siguen una distribución normal.

---

### Recomendaciones

---

Las recomendaciones para futuras investigaciones acerca de la aceleración en el eje  $z$  del satélite Quetzal-1, son:

1. Obtener un método para poder diferenciar los datos del satélite, debido a que estos son continuos por partes.
2. Investigar la implementación del método de Flatley [5] para obtener la curva de histéresis con la modificación de utilizar los datos proporcionados del satélite.
3. Investigar acerca del modelaje de calor disipado en un material ferromagnético debido a el fenómeno de histéresis, que está relacionado al área encerrada por la curva de histéresis.
4. A partir de la de diferenciación de los datos experimentales suavizados de las velocidades angulares, obtener la aceleración angular experimental suavizada.
5. Investigar la aceleración en las componentes  $x$  y  $y$  de la velocidad angular del satélite Quetzal-1.

- [1] *corrcoef*. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/corrcoef.html>.
- [2] *jbtest*, 2005. <https://www.mathworks.com/help/stats/jbtest.html>.
- [3] Aguilar, Aldo: *Operations Phase for Quetzal-1. Guatemalan Cubesat Project*, 2020. <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1wgHU53lnVJ8tIgb1xFSEp9s2nywP3HEm>.
- [4] CubeSat: *The CubeSat Program*, n.d. <https://www.cubesat.org/about>.
- [5] Dahl, Philip R.: *Magnetic hysteresis model*. *Advances in the Astronautical Sciences*, 78:119–134, 1992, ISSN 00653438.
- [6] Gerhardt, David T: *Small Satellite Passive Magnetic Attitude Control*. Tesis de Doctorado, 2014.
- [7] Gerhardt, David T y Scott E Palo: *Passive Magnetic Attitude Control for CubeSat Spacecraft Conference on Small Satellites*. página 10, 2010. <http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1230&context=smallsat>.
- [8] Ghuffar, Sajid: *Design and Implementation of Attitude Determination Algorithm for the Cubesat UWE-3*. Tesis de Licenciatura, Luleå University of Technology, 2009.
- [9] Mabrouk, Elizabeth: *What are SmallSats and CubeSats?*, Mar 2015. <https://www.nasa.gov/content/what-are-smallsats-and-cubesats>.
- [10] Mehrparvar, Arash: *CubeSat Design Specification*, Feb 2014. [https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds\\_rev13\\_final2.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf).
- [11] Paluszek, Michael, Pradeep Bhatta, Paul Griesemer, Joseph Mueller, Stephanie Thomas y Princeton Satellite Systems: *Spacecraft Attitude and Orbit Control*, volumen 1. Princeton Satellite Systems, Inc., 3rd editio edición, 2012, ISBN 9780965470100.
- [12] Princeton Satellite Systems: *CubeSat Toolbox*, 2020. <http://www.psatellite.com/products/sct/cubesat-toolbox/>.
- [13] Rawashdeh, Samir A.: *Attitude analysis of small satellites using model-based simulation*. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 2019, ISSN 16875974.
- [14] Rawashdeh, Samir Ahmed: *PASSIVE ATTITUDE STABILIZATION FOR SMALL SATELLITES*. Thesis, University of Kentucky Master's, 2010. [https://uknowledge.uky.edu/gradschool\\_{\\_}theses/624/](https://uknowledge.uky.edu/gradschool_{_}theses/624/).

- [15] Serway, Raymond A., John W Jewett, Rodríguez Pedroza María del Carmen y Ernesto Filio López: *Física para ciencias e ingeniería*, volumen 1. Novena edición, 2015.
- [16] Sorolla, Paula: *Study and Design of the attitude control of a cubesat 1U based on reaction wheels*, 2019.
- [17] Stephen Thorton, Jerry Marion: *Classical Dynamics of Particles and Systems*. 5ta edición edición, Julio 2003.
- [18] Vinther, Kasper, Kasper F Jensen, Jesper A Larsen y Rafael Wisniewski: *Inexpensive Cubesat Attitude Estimation using Quaterinons and Unscented Kalman Filtering*. (1999), 2001.
- [19] Álvarez, Dan: *Cubesat Phase: 5. Module: Attitude Determination and Control System*, 2019.

---

## Códigos utilizados

---

### A.1. Quetzal1\_Distrubance\_Analyzer.m

Este código fue hecho originalmente por el autor [3]. Por otro lado, el código fue editado para obtener las gráficas de este trabajo de graduación.

```
% % =====  
% Titulo: Quetzal1_Disturbance_Analyzer.m  
% Autor: Aldo Aguilar Nadalini  
% Fecha: 18 de agosto de 2020  
% Descripcion: Programa que analiza disturbance torques sobre Quetzal-1  
%             utilizando telemetria recibida de satelite  
% =====  
  
%% PARAMETROS DE CONFIGURACION DE ANALIZADOR -----  
  
% Paths de documentos que contienen data (cambiar dependiendo computadora)  
file_telemetry = '/Users/quiebres/Documents/IvanMaldonado/UVG/OctavoSemestre/TrabajoDeGraduacion/Quetzal-1  
file_velocities = '/Users/quiebres/Documents/IvanMaldonado/UVG/OctavoSemestre/TrabajoDeGraduacion/Quetzal-1  
  
% Seleccionar semana a analizar (1-21)  
week_no = 21;  
  
graficar = 1;  
% Activado de filtro de datos dependiendo error de cuaternion  
% 0 - Filtro desactivado; 1 - Filtro activado  
ERROR_FILTER = 0;  
error_threshold = 10; % Maximo de error aceptable en cuaternion  
  
% Ajuste de filtro de medias moviles para datos de velocidad y aceleracion  
% angular de satelite  
window_size_gyros = 21;  
window_size_torques = 50;  
if (week_no == 0)
```

```

    window_size_torques = window_size_torques*3;
end

% -----
% Cantidad de beacons por semana
% -----
% Week 1: 1 - 1074 (1074)
% Week 2: 1 - 1136 (1136)
% Week 3: 1 - 1302 (1302)
% Week 4: 1 - 1615 (1615)
% Week 5: 1 - 1216 (1216)
% Week 6: 1 - 1159 (1159)
% Week 7: 1 - 1935 (1935)
% Week 8: 1 - 2309 (2309)
% Week 9: 1 - 2566 (2566)
% Week 10: 1 - 3686 (3686)
% Week 11: 1 - 3692 (3692)
% Week 12: 1 - 3641 (3641)
% Week 13: 1 - 3011 (3011)
% Week 14: 1 - 3586 (3586)
% Week 15: 1 - 2650 (2650)
% Week 16: 1 - 2627 (2627)
% Week 17: 1 - 2567 (2567)
% Week 18: 1 - 3601 (3601)
% Week 19: 1 - 3509 (3509)
% Week 20: 1 - 2987 (2987)
% Week 21: 1 - 2721 (2721)
% -----

% Indices de beacons por semana
weeks = [0,1074,1136,1302,1615,1216,1159,1935,2309,2566,3686,3692,3641,3011,3586,2650,2627,2567,3601,3509,2721];
if (week_no > 0)
    start_beacon = sum(weeks(1:week_no)) + 1;
    end_beacon = sum(weeks(1:week_no)) + weeks(week_no + 1);
else
    start_beacon = weeks(1) + 1;
    end_beacon = sum(weeks);
end

%% Extraccion de datos de telemetria -----
[telemetry, headers, ~] = xlsread(file_telemetry); % Extraer toda la telemetria recibida de file_telemetry
[velocities, ~, ~] = xlsread(file_velocities); % Extraer todas las velocidades ECI calculadas de file_velocities

% UTC Timestamps
timestamps = char(headers(start_beacon + 1:end_beacon + 1, 1)); % Separar data correspondiente a UTC Timestamps

% Giroscopio de 3 ejes (NOTA: IMU esta girado -90 sobre Eje Z respecto a
% Body frame, por eso Gyro_Y da mediciones en X y -Gyro_X da mediciones en
% Y)
gyroscope_x = telemetry(start_beacon:end_beacon, 48); % Separar data correspondiente a Wx (m/s^2)
gyroscope_y = -1.*telemetry(start_beacon:end_beacon, 47); % Separar data correspondiente a Wy (m/s^2)
gyroscope_z = telemetry(start_beacon:end_beacon, 49); % Separar data correspondiente a Wz (m/s^2)

% Magnetometro de 3 ejes (NOTA: IMU esta girado -90 sobre Eje Z respecto a
% Body frame, por eso Gyro_Y da mediciones en X y -Gyro_X da mediciones en
% Y)
magnetometer_x = telemetry(start_beacon:end_beacon, 51); % Separar data correspondiente a Bx (mT)
magnetometer_y = -1.*telemetry(start_beacon:end_beacon, 50); % Separar data correspondiente a By (mT)
magnetometer_z = telemetry(start_beacon:end_beacon, 52); % Separar data correspondiente a Bz (mT)

```

```

% Fotodiodos sobre los 6 paneles solares
photodiode_xpos_1 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 53); % Separar data correspondiente a ADC1 CI
photodiode_yneg_1 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 54); % Separar data correspondiente a ADC1 CI
photodiode_xneg_1 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 55); % Separar data correspondiente a ADC1 CI
photodiode_ypos_1 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 56); % Separar data correspondiente a ADC1 CI
photodiode_zpos_1 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 57); % Separar data correspondiente a ADC1 CI
photodiode_zneg_1 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 58); % Separar data correspondiente a ADC1 CI
photodiode_xpos_2 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 59); % Separar data correspondiente a ADC2 CI
photodiode_yneg_2 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 60); % Separar data correspondiente a ADC2 CI
photodiode_xneg_2 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 61); % Separar data correspondiente a ADC2 CI
photodiode_ypos_2 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 62); % Separar data correspondiente a ADC2 CI
photodiode_zpos_2 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 63); % Separar data correspondiente a ADC2 CI
photodiode_zneg_2 = telemetry(start_beacon:end_beacon, 64); % Separar data correspondiente a ADC2 CI

%% Extraccion de posicion de satelite en marcos de referencia ECI y LLA ---

% Extraccion de datos de posicion ECI (Earth-centered Inertial Frame)
x_eci = telemetry(start_beacon:end_beacon, 4); % Separar data correspondiente a coordenada x
y_eci = telemetry(start_beacon:end_beacon, 5); % Separar data correspondiente a coordenada y
z_eci = telemetry(start_beacon:end_beacon, 6); % Separar data correspondiente a coordenada z
r = [x_eci, y_eci, z_eci]'; % Array de posiciones ECI (3 x m)

% Extraccion de datos de velocidad ECI (Earth-centered Inertial Frame)
vx_eci = velocities(start_beacon:end_beacon, 1); % Separar data correspondiente a velocidad x
vy_eci = velocities(start_beacon:end_beacon, 2); % Separar data correspondiente a velocidad y
vz_eci = velocities(start_beacon:end_beacon, 3); % Separar data correspondiente a velocidad z
v = [vx_eci, vy_eci, vz_eci]'; % Array de velocidades ECI (3 x m)

% Extraccion de datos de posicion LLA (Longitude - Latitude - Altitude)
longitudes = telemetry(start_beacon:end_beacon, 7); % Separar data correspondiente a longitud
latitudes = telemetry(start_beacon:end_beacon, 8); % Separar data correspondiente a latitud
altitudes = telemetry(start_beacon:end_beacon, 9); % Separar data correspondiente a altitud

%% Conversion de Timestamps a Fechas en formato Julian Calendar -----
JD = [];
[n,~] = size(timestamps);
for i = 1:n
    timestamp = timestamps(i,:);
    year = str2double(timestamp(18:end));
    month = str2double(timestamp(15:16));
    day = str2double(timestamp(12:13));
    hour = str2double(timestamp(1:2));
    minute = str2double(timestamp(4:5));
    sec = str2double(timestamp(7:8));
    JD(end + 1) = Date2JD([year, month, day, hour, minute, sec]); % Array de fechas Julianas (1 x m)
end

%% Calculo de Vector Magnetico en Body Frame (Marco de referencia de satelite)

% Calibracion por medio de fitted coefficients (Springmann, 2012)
% Se puede encontrar estos coeficientes usando magnetometer_calibration.m
coeff = [1.0218; 0.9605; 1.2415; 42.8907; 62.6603; 163.6372];

% Calibracion en orbita de mediciones de magnetometro para evitar offsets
% causados por iman a bordo
calibrated_Bx = ((magnetometer_x - coeff(4))./coeff(1)) .* 1000; % Convertir a nT
calibrated_By = ((magnetometer_y - coeff(5))./coeff(2)) .* 1000;
calibrated_Bz = ((magnetometer_z - coeff(6))./coeff(3)) .* 1000;

```

```

% Normalizacion de vector magnetico
x_magnetic_component = [];
y_magnetic_component = [];
z_magnetic_component = [];
n = length(calibrated_Bx);
for k = 1:n
    % Calcular componentes XYZ de vectos magnetico unitario
    mag_vector = (calibrated_Bx(k)^2 + calibrated_By(k)^2 + calibrated_Bz(k)^2)^(1/2);
    if (mag_vector ~= 0)
        x_magnetic_component(end + 1) = calibrated_Bx(k)/mag_vector;
        y_magnetic_component(end + 1) = calibrated_By(k)/mag_vector;
        z_magnetic_component(end + 1) = calibrated_Bz(k)/mag_vector;
    else
        x_magnetic_component(end + 1) = calibrated_Bx(k);
        y_magnetic_component(end + 1) = calibrated_By(k);
        z_magnetic_component(end + 1) = calibrated_Bz(k);
    end
end
nonNmBody = [calibrated_Bx'.*1e-9; calibrated_By'.*1e-9; calibrated_Bz'.*1e-9]; % Array de vectores n
mBody = [x_magnetic_component; y_magnetic_component; z_magnetic_component]; % Array de vectores magneticos u

%% Calculo de Vector Solar en Body Frame (Marco de referencia de satellite)

% Variables de operacion
MAX_VOLTAGE = 2.5; % Voltaje maximo de salida de fotodiodos
DEGRADATIONS = [0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 1.0]; % Perdidas de voltaje maximo en cada ca

% Inicializar listados
x_solar_component = [];
y_solar_component = [];
z_solar_component = [];

% Calcular vector solar
n = length(photodiode_xpos_1);
for i = 1:n

    % Obtener mediciones de fotodiodos (V)
    light_x_pos = (photodiode_xpos_1(i) + photodiode_xpos_2(i))/2.0;
    light_y_neg = (photodiode_yneg_1(i) + photodiode_yneg_2(i))/2.0;
    light_x_neg = (photodiode_xneg_1(i) + photodiode_xneg_2(i))/2.0;
    light_y_pos = (photodiode_ypos_1(i) + photodiode_ypos_2(i))/2.0;
    light_z_pos = (photodiode_zpos_1(i) + photodiode_zpos_2(i))/2.0;
    light_z_neg = (photodiode_zneg_1(i) + photodiode_zneg_2(i))/2.0;

    % Calcular componente solar sobre eje X
    if (max([light_x_pos, light_x_neg]) == light_x_pos)
        x_solar = light_x_pos/(MAX_VOLTAGE - DEGRADATIONS(1));
    else
        x_solar = -light_x_neg/(MAX_VOLTAGE - DEGRADATIONS(2));
    end

    % Calcular componente solar sobre eje Y
    if (max([light_y_pos, light_y_neg]) == light_y_pos)
        y_solar = light_y_pos/(MAX_VOLTAGE - DEGRADATIONS(3));
    else
        y_solar = -light_y_neg/(MAX_VOLTAGE - DEGRADATIONS(4));
    end
end

```

```

% Calcular componente solar sobre eje Z
if (max([light_z_pos, light_z_neg]) == light_z_pos)
    z_solar = light_z_pos/(MAX_VOLTAGE - DEGRADATIONS(5));
else
    z_solar = -light_z_neg/(MAX_VOLTAGE - DEGRADATIONS(6));
end

% Calcular componentes XYZ de vectos solar unitario
mag_vector = (x_solar^2 + y_solar^2 + z_solar^2)^(1/2);
if (mag_vector ~= 0)
    x_solar_component(end + 1) = x_solar/mag_vector;
    y_solar_component(end + 1) = y_solar/mag_vector;
    z_solar_component(end + 1) = z_solar/mag_vector;
else
    x_solar_component(end + 1) = x_solar;
    y_solar_component(end + 1) = y_solar;
    z_solar_component(end + 1) = z_solar;
end
end

sBody = [x_solar_component; y_solar_component; z_solar_component]; % Array de vectores solares unitarios (

%% Calculo de Vector Magnetico en ECI Frame (Marco de referencia de Tierra)

% Obtener data de Vector Magnetico B respecto a marco de referencia ECI
mECI = [];

% Modelo IGRF-12
n = length(longitudes);
for i = 1:n
    alt = altitudes(i)*1000; % Ajustar altitudes a metros
    julian_date = JD2Date(JD(i) - 365.25); % Restarle un ao exacto (365.25 rotaciones)
    dec_date = decyear(julian_date(1), julian_date(2), julian_date(3), julian_date(4), julian_date(5), julian_date(6));
    [B,~,~,~,~,~,~,~] = igrfmagm(alt,latitudes(i),longitudes(i),dec_date,12); % Obtener vector magnetico
    Bhat = B./norm(B); % Convertir en vector unitario

    % Convertir vector en marco referencial North-East-Down (NED) a
    % vector en marco referencial Earth-fixed Inertial Frame (ECI)
    Bhat = NEDtoECI(Bhat', r(:,i), JD(i));
    Bhat = Bhat./norm(Bhat);
    mECI(:,end + 1) = Bhat; % Array de vectores magneticos unitarios
end

%% Calculo de Vector Solar en ECI Frame (Marco de referencia de Tierra) ---

% Calcular vector solar ECI
[sECI, magSun] = SunV1(JD, r); % Array de vectores solares unitarios (

% Calcular momentos de eclipse
eclipse = Eclipse(r, sECI.*magSun);

%% Ejecutar Metodo Single Value Decomposition (SVD) -----
% Descripcion: Estimacion de matriz de attitude optima para resolver
% Wahba's Problem y su cuaternion correspondiente

% Calcular matriz B, ejecutar SVD y computar matriz de rotacion optima con
% su cuaternion correspondiente
q = [];
var_m = 1;

```

```

var_ss = 20; % Darle menor ponderacion a vector solar
[~,n] = size(mBody);
for k = 1:n
    B_k = (1/var_m)*mBody(:,k)*transpose(mECI(:,k)) + (1/var_ss)*sBody(:,k)*transpose(sECI(:,k));
    [U_k, S_k, V_k] = svd(B_k); % Ejecutar SVD de matriz B
    A_opt_k = U_k * diag([1; 1; det(U_k)*det(V_k)]) * transpose(V_k); % Calcular matriz optima de rotacion
    q_opt_k = Mat2Q(A_opt_k); % Obtener cuaternion optimo de rotacion
    q(:,end + 1) = q_opt_k;
end

%% Filtrado de datos -----

% Filtrar datos incorrectos de magnetometros y datos en eclipse
JD = JD(magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0);
r = r(:,magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0);
v = v(:,magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0);
latitudes = latitudes(magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0);
longitudes = longitudes(magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0);
sECI = sECI(:,magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0);
mECI = mECI(:,magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0);
sBody = sBody(:,magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0);
mBody = mBody(:,magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0);
q = q(:,magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0);
nonNmBody = nonNmBody(:,magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0);

%% Calculo de error de cuaterniones y filtrado -----

% Calcular error entre vectores medidos en Body Frame y vectores en
% marco de referencia ECI transformados a Body Frame con cuaternion
% estimado
error_sun = [];
error_mag = [];
sECI_to_b = QForm(q, sECI);
mECI_to_b = QForm(q, mECI);
[~,n] = size(q);
for k = 1:n
    angle_sun = atan2d(norm(cross(sECI_to_b(:,k),sBody(:,k))),dot(sECI_to_b(:,k),sBody(:,k)));
    angle_mag = atan2d(norm(cross(mECI_to_b(:,k),mBody(:,k))),dot(mECI_to_b(:,k),mBody(:,k)));
    error_sun(end + 1) = abs(angle_sun/180.0) * 100;
    error_mag(end + 1) = abs(angle_mag/180.0) * 100;
end

% Filtrado de datos que presentan error alto
if (ERROR_FILTER == 1)
    EMAX = error_threshold;
    JD = JD(error_sun < EMAX & error_mag < EMAX);
    r = r(:,error_sun < EMAX & error_mag < EMAX);
    v = v(:,error_sun < EMAX & error_mag < EMAX);
    latitudes = latitudes(error_sun < EMAX & error_mag < EMAX);
    longitudes = longitudes(error_sun < EMAX & error_mag < EMAX);
    sECI = sECI(:,error_sun < EMAX & error_mag < EMAX);
    mECI = mECI(:,error_sun < EMAX & error_mag < EMAX);
    sBody = sBody(:,error_sun < EMAX & error_mag < EMAX);
    mBody = mBody(:,error_sun < EMAX & error_mag < EMAX);
    q = q(:,error_sun < EMAX & error_mag < EMAX);
    angles = angles(error_sun < EMAX & error_mag < EMAX);
    error_mag = error_mag(error_sun < EMAX);
    error_sun = error_sun(error_sun < EMAX);
end

```

```

%% Suavizacin de componentes magnticas
% Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
smoothed_mBodyx = [];
smoothed_mBodyy = [];
smoothed_mBodyz = [];
window_size = window_size_gyros;
[~,nn] = size(mBody(3,:));
for k = 1:nn

    % Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k
    min_index = window_size/2 + 1;
    if (k < min_index)
        start_index = 1;
    else
        start_index = k - window_size/2;
    end

    % Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k
    end_index = k + window_size/2;
    if (end_index > nn)
        end_index = nn;
    end

    % Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
    % para obtener punto k suavizado
    smoothed_mBodyx(end + 1) = mean(mBody(1,start_index:end_index));
    smoothed_mBodyy(end + 1) = mean(mBody(2,start_index:end_index));
    smoothed_mBodyz(end + 1) = mean(mBody(3,start_index:end_index));
end

%% Clculo del ngulo entre el vector magntico y en eje x, y & z del satlite
% Calculo de angulo entre campo magntico & eje x
anglesMX = []; % Nadir en Body Frame
[~,n] = size(q);
for k = 1:n
    angleMX_k = atan2d(norm(cross(mBody(:,k), [1;0;0])),dot(mBody(:,k), [1;0;0]));
    anglesMX(end + 1) = angleMX_k;
end

% Calculo de angulo entre campo magntico & eje y
anglesMY = []; % Nadir en Body Frame
[~,n] = size(q);
for k = 1:n
    angleMY_k = atan2d(norm(cross(mBody(:,k), [0;1;0])),dot(mBody(:,k), [0;1;0]));
    anglesMY(end + 1) = angleMY_k;
end

% Calculo de angulo entre campo magntico & eje z
anglesMZ = []; % Nadir en Body Frame
[~,n] = size(q);
for k = 1:n
    angleMZ_k = atan2d(norm(cross(mBody(:,k), [0;0;1])),dot(mBody(:,k), [0;0;1]));
    anglesMZ(end + 1) = angleMZ_k;
end

% Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
smoothed_anglesMX = [];
smoothed_anglesMY = [];
smoothed_anglesMZ = [];
window_size = window_size_gyros;

```

```

[~,nn] = size(anglesMZ);
for k = 1:nn

    % Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k
    min_index = window_size/2 + 1;
    if (k < min_index)
        start_index = 1;
    else
        start_index = k - window_size/2;
    end

    % Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k
    end_index = k + window_size/2;
    if (end_index > nn)
        end_index = nn;
    end

    % Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
    % para obtener punto k suavizado
    smoothed_anglesMX(end + 1) = mean(anglesMX(start_index:end_index));
    smoothed_anglesMY(end + 1) = mean(anglesMY(start_index:end_index));
    smoothed_anglesMZ(end + 1) = mean(anglesMZ(start_index:end_index));
end

%% Calculo para grafica de barras de histeresis
% Se utiliza un modelos de tangente inversa
if week_no ~= 0
    Bs = 0.3; % Saturacion en T
    Br = 6.0618e-4; % Remanencia en T
    Hc = 0.3381; % Fuerza coerciva en A/m
    D = 1e-3; % Diametro de barras m
    L = 95e-3; % Largo de barras m
    mu0 = 4*pi*1e-7;
    Vhyst = L/4*D^2;
    % Se suaviza el campo magnetico en x & en y
    % Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
    Hax = nonNmBody(1,:)/mu0;
    Hay = nonNmBody(2,:)/mu0;
    Hax_filtered = [];
    Hay_filtered = [];
    window_size = window_size_torques;
    [~,n] = size(Hax);
    for k = 1:n

        % Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k
        min_index = window_size/2 + 1;
        if (k < min_index)
            start_index = 1;
        else
            start_index = k - window_size/2;
        end

        % Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k
        end_index = k + window_size/2;
        if (end_index > n)
            end_index = n;
        end

        % Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
        % para obtener punto k suavizado

```

```

    Hax_filtered(end + 1) = mean(Hax(start_index:end_index));
    Hay_filtered(end + 1) = mean(Hay(start_index:end_index));
end

[hystLx_smoothed, hystRx_smoothed, Bhystx_smoothed] = hystCurve(Bs,Br,Hc,Hax_filtered,D,L); % B/H en x & B
[hystLy_smoothed, hystRy_smoothed, Bhysty_smoothed] = hystCurve(Bs,Br,Hc,Hay_filtered,D,L); % B/H en y & B
mHystx_smoothed = Bhystx_smoothed.*Vhyst./mu0;
mHysty_smoothed = Bhysty_smoothed.*Vhyst./mu0;
[hystLx, hystRx, Bhystx] = hystCurve(Bs,Br,Hc,Hax,D,L); % B/H en x & B
[hystLy, hystRy, Bhysty] = hystCurve(Bs,Br,Hc,Hay,D,L); % B/H en y & B
mHystx = Bhystx.*Vhyst./mu0;
mHysty = Bhysty.*Vhyst./mu0;
end
%% Calculo de torques externos causado por disturbances (atmosfera, Sol, Gravedad)

% Parametros de Quetzal-1
d = struct;
d.mass = 1.040; % Masa de Quetzal-1 [kg]
d.inertia = [0.001816 0 0;
            0 0.001882 0;
            0 0 0.001621]; % Matriz de inercia de Quetzal-1 [kg*m^2]
d.cM = [0.067e-3; -1.577e-3; 2.509e-3]; % Offset de centro de masa de Quetzal-1
[a,n,rr] = CubeSatFaces('1U'); % Seleccionar modelo de cubesat 1U
d.nFace = n; % Vectores normales respecto a cada cara
d.area = a; % Area de las caras
d.rFace = rr; % Distancias de centro a cada cara;
d.cD = 2.4; % Drag coefficient de Quetzal-1
d.dipole = [0;0;0]; % Asumiendo cero magnetismo residual en
d.skewOmegaEarth = Skew2([0;0;7.291e-5]); % Velocidad angular de Tierra [NOTA: Se
pp = {'solar panel' 'solar panel' 'solar panel' ...
     'solar panel' 'solar panel' 'solar panel'}; % Paneles solares en todas las caras de
d.optical = OpticalSurfaceProperties(pp); % Determinar propiedades opticas de paneles
d.att = CubeSatAttitude;
d.planet = 1; % 1 = Earth

% Calculo de disturbance torques sobre Quetzal-1
sprintf('Calculating disturbances...')
[t, ~, ~, ~, tD, tS, tRD, tGG] = CubeSatDisturbanceAnalysis(d, q, r, v, JD);
% Calculo de magnetic torque sobre Quetzal-1
tMF= []; % torque magntico en Body Frame
[~,n] = size(q);
if week_no ~=0
    for k = 1:n
        tMFcomp = cross([mHystx_smoothed(k);mHysty_smoothed(k);0.7363],nonNmBody(:,k));
        tMF(:,end + 1) = tMFcomp;
    end
else
    for k = 1:n
        tMFcomp = cross([0;0;0.7363],nonNmBody(:,k));
        tMF(:,end + 1) = tMFcomp;
    end
end
end

%% Procesamiento individual de torques externos -----

% Calcular magnitudes de todos los torques
tAero = (tD(1,:).^2 + tD(2,:).^2 + tD(3,:).^2).^(1/2);
tSolar = (tS(1,:).^2 + tS(2,:).^2 + tS(3,:).^2).^(1/2);

```

```

tDipole = (tRD(1,:).^2 + tRD(2,:).^2 + tRD(3,:).^2).^(1/2);
tGravity = (tGG(1,:).^2 + tGG(2,:).^2 + tGG(3,:).^2).^(1/2);
tMag = (tMF(1,:).^2 + tMF(2,:).^2 + tMF(3,:).^2).^(1/2);
% Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
tAero_filtered = [];
tMag_filtered = [];
tSolar_filtered = [];
tDipole_filtered = [];
tGravity_filtered = [];
window_size = window_size_torques;
[~,n] = size(tAero);
for k = 1:n

    % Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k
    min_index = window_size/2 + 1;
    if (k < min_index)
        start_index = 1;
    else
        start_index = k - window_size/2;
    end

    % Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k
    end_index = k + window_size/2;
    if (end_index > n)
        end_index = n;
    end

    % Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
    % para obtener punto k suavizado
    tAero_filtered(end + 1) = mean(tAero(start_index:end_index));
    tMag_filtered(end + 1) = mean(tMag(start_index:end_index));
    tSolar_filtered(end + 1) = mean(tSolar(start_index:end_index));
    tDipole_filtered(end + 1) = mean(tDipole(start_index:end_index));
    tGravity_filtered(end + 1) = mean(tGravity(start_index:end_index));
end

%% Procesamiento por componente de torque aerodinmico -----
% Calcular las componentes del torque aerodinmico
tAerox = tD(1,:);
tAeroy = tD(2,:);
tAeroz = tD(3,:);

% Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
tAerox_filtered = [];
tAeroy_filtered = [];
tAeroz_filtered = [];
window_size = window_size_torques;
[~,n] = size(tAerox);
for k = 1:n

    % Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k
    min_index = window_size/2 + 1;
    if (k < min_index)
        start_index = 1;
    else
        start_index = k - window_size/2;
    end

    % Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k

```

```

end_index = k + window_size/2;
if (end_index > n)
    end_index = n;
end

% Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
% para obtener punto k suavizado
tAerox_filtered(end + 1) = mean(tAerox(start_index:end_index));
tAeroy_filtered(end + 1) = mean(tAeroy(start_index:end_index));
tAeroz_filtered(end + 1) = mean(tAeroz(start_index:end_index));
end

%% Procesamiento por componente de torque magntico -----
% Calcular las componentes del torque aerodinmico
tMFx = tMF(1,:);
tMFy = tMF(2,:);
tMFz = tMF(3,:);

% Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
tMFx_filtered = [];
tMFy_filtered = [];
tMFz_filtered = [];
window_size = window_size_torques;
[~,n] = size(tMFx);
for k = 1:n

    % Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k
    min_index = window_size/2 + 1;
    if (k < min_index)
        start_index = 1;
    else
        start_index = k - window_size/2;
    end

    % Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k
    end_index = k + window_size/2;
    if (end_index > n)
        end_index = n;
    end

    % Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
    % para obtener punto k suavizado
    tMFx_filtered(end + 1) = mean(tMFx(start_index:end_index));
    tMFy_filtered(end + 1) = mean(tMFy(start_index:end_index));
    tMFz_filtered(end + 1) = mean(tMFz(start_index:end_index));
end

%% Procesamiento por componente de torque por presin solar -----
% Calcular las componentes del torque por presin solar
tSolarx = tS(1,:);
tSolary = tS(2,:);
tSolarz = tS(3,:);

% Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
tSolarx_filtered = [];
tSolary_filtered = [];
tSolarz_filtered = [];
window_size = window_size_torques;
[~,n] = size(tSolarx);
for k = 1:n

```

```

% Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k
min_index = window_size/2 + 1;
if (k < min_index)
    start_index = 1;
else
    start_index = k - window_size/2;
end

% Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k
end_index = k + window_size/2;
if (end_index > n)
    end_index = n;
end

% Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
% para obtener punto k suavizado
tSolarx_filtered(end + 1) = mean(tSolarx(start_index:end_index));
tSulary_filtered(end + 1) = mean(tSulary(start_index:end_index));
tSolarz_filtered(end + 1) = mean(tSolarz(start_index:end_index));
end

%% Procesamiento por componente de torque por Gradiente Gravitacional -----
% Calcular las componentes del torque por presin solar
tGravityx = (tGG(1,:));
tGravityy = (tGG(2,:));
tGravityz = (tGG(3,:));

% Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
tGravityx_filtered = [];
tGravityy_filtered = [];
tGravityz_filtered = [];
window_size = window_size_torques;
[~,n] = size(tGravityx);
for k = 1:n

    % Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k
    min_index = window_size/2 + 1;
    if (k < min_index)
        start_index = 1;
    else
        start_index = k - window_size/2;
    end

    % Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k
    end_index = k + window_size/2;
    if (end_index > n)
        end_index = n;
    end

    % Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
    % para obtener punto k suavizado
    tGravityx_filtered(end + 1) = mean(tGravityx(start_index:end_index));
    tGravityy_filtered(end + 1) = mean(tGravityy(start_index:end_index));
    tGravityz_filtered(end + 1) = mean(tGravityz(start_index:end_index));
end

%% Procesamiento de torque neto, neto en componentes y aceleracion angular de Quetzal-1

```

```

% Calculo de torque total en componentes
tx = tGravityx + tSolarx + tAerox + tMFx;           % Torque neto en x
ty = tGravityy + tSolary + tAeroy + tMFy;           % Torque neto en y
tz = tGravityz + tSolarz + tAeroz + tMFz;           % Torque neto en z

% Calculo de magnitud de torque total sobre satellite
% tmag = (t(1,:).^2 + t(2,:).^2 + t(3,:).^2).^(1/2); % Torque neto en N*m
tmag = (tx.^2 + ty.^2 + tz.^2).^(1/2);
% Calculo de aceleracion angular
a_q = 0.100;                                         % Arista de satellite mide 10cm
m_q = 1.040;                                         % Masa de satellite es de 1.014kg
I_q = m_q * (a_q^2)/6.0 ;                            % Inercia de un cubo que gira sobre su
alphas = tmag./I_q;

% Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
smoothed_alphas = [];
smoothed_tx = [];
smoothed_ty = [];
smoothed_tz = [];
window_size = window_size_torques;
[~,n] = size(alphas);
for k = 1:n

    % Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k
    min_index = window_size/2 + 1;
    if (k < min_index)
        start_index = 1;
    else
        start_index = k - window_size/2;
    end

    % Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k
    end_index = k + window_size/2;
    if (end_index > n)
        end_index = n;
    end

    % Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
    % para obtener punto k suavizado
    smoothed_alphas(end + 1) = mean(alphas(start_index:end_index));
    smoothed_tx(end + 1) = mean(tx(start_index:end_index));
    smoothed_ty(end + 1) = mean(ty(start_index:end_index));
    smoothed_tz(end + 1) = mean(tz(start_index:end_index));
end

%% Procesamiento de velocidad angular -----

% Velocidad angular de satellite
gyro_mag = (gyroscope_x.^2 + gyroscope_y.^2 + gyroscope_z.^2).^(1/2); % Calcular magnitud de velocidad rota
gyro_mag = gyro_mag(magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0); % Filtrar datos que correspondan a beac
if (ERROR_FILTER == 1)
    EMAX = error_threshold;
    gyro_mag = gyro_mag(error_sun < EMAX & error_mag < EMAX); % Filtrar datos que correspondan a beac
end

% Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
smoothed_gyro_mag = [];
window_size = window_size_gyros;
[~,nn] = size(gyro_mag');

```

```

for k = 1:nn

    % Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k
    min_index = window_size/2 + 1;
    if (k < min_index)
        start_index = 1;
    else
        start_index = k - window_size/2;
    end

    % Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k
    end_index = k + window_size/2;
    if (end_index > nn)
        end_index = nn;
    end

    % Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
    % para obtener punto k suavizado
    smoothed_gyro_mag(end + 1) = mean(gyro_mag(start_index:end_index));
end

% Calculo de aceleracion promedio observada por giroscopios de Quetzal-1
if (week_no == 0)
    no_dias = 7*(length(weeks) - 1);
else
    no_dias = 7;
end
[w_i,idx_min] = min(smoothed_gyro_mag); % Velocidad angular minima en primera s
[w_f,idx_max] = max(smoothed_gyro_mag); % Velocidad angular maxima hasta la fech
dT = no_dias*(24*60*60); % Dias en orbita convertidos a segundos
if (idx_min < idx_max)
    a_prom = (w_f - w_i)/dT; % Aceleracion angular promedio medida p
else
    a_prom = -(w_f - w_i)/dT; % Desaceleracion angular promedio medida
end

%% Procesamiento de velocidad angular por componentes -----
gyrox = gyroscope_x; % Velocidad rotacional en x de satellite
gyrox = gyrox(magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0); % Filtrar datos que correspondan a beaco
gyroy = gyroscope_y; % Velocidad rotacional en y de satellite
gyroy = gyroy(magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0); % Filtrar datos que correspondan a beaco
gyroz = gyroscope_z; % Velocidad rotacional en z de satellite
gyroz = gyroz(magnetometer_x' ~= 0.0198 & eclipse ~= 0); % Filtrar datos que correspondan a beaco
if (ERROR_FILTER == 1)
    EMAX = error_threshold;
    gyrox = gyrox(error_sun < EMAX & error_mag < EMAX); % Filtrar datos que correspondan a beaco
    gyroy = gyroy(error_sun < EMAX & error_mag < EMAX); % Filtrar datos que correspondan a beaco
    gyroz = gyroz(error_sun < EMAX & error_mag < EMAX); % Filtrar datos que correspondan a beaco
end

% Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
smoothed_gyrox = [];
smoothed_gyroy = [];
smoothed_gyroz = [];
window_size = window_size_gyros;
[~,nn] = size(gyrox');
for k = 1:nn

    % Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k

```

```

min_index = window_size/2 + 1;
if (k < min_index)
    start_index = 1;
else
    start_index = k - window_size/2;
end

% Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k
end_index = k + window_size/2;
if (end_index > nn)
    end_index = nn;
end

% Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
% para obtener punto k suavizado
smoothed_gyrox(end + 1) = mean(gyrox(start_index:end_index));
smoothed_gyroxy(end + 1) = mean(gyroxy(start_index:end_index));
smoothed_gyroz(end + 1) = mean(gyroz(start_index:end_index));
end

%% Clculo de aceleracin angular por componentes -----
% particin por tiempos continuos con un espaciado de 10 segundos
% deltat = abs(JD(1)-JD(2));
% Fw = [];
% Ft = [];
% alphaExp = [];
% [~,nnn] = size(gyroz');
% contador = 1;
% for k = 1:nnn
%     if k == nnn
%         if abs(JD(k-1)-JD(k))> deltat
%             Fw(k) = gyroz(k);
%             Ft(k) = JD(k);
%             dwdt = gradient(Fw(:)) ./ gradient(Ft(:));
%             alphaExp = cat(1,alphaExp,dwdt);
%             Fw = [];
%             Ft = [];
%             dwdt = [];
%         else
%             Fw(k) = gyroz(k);
%             Ft(k) = JD(k);
%             dwdt = gradient(Fw(:)) ./ gradient(Ft(:));
%             alphaExp = cat(1,alphaExp,dwdt);
%         end
%     else
%         if abs(JD(k+1)-JD(k))> deltat
%             Fw(k) = gyroz(k);
%             Ft(k) = JD(k);
%             dwdt = gradient(Fw(:)) ./ gradient(Ft(:));
%             alphaExp = cat(1,alphaExp,dwdt);
%             Fw = [];
%             Ft = [];
%             dwdt = [];
%         else
%             Fw(k) = gyroz(k);
%             Ft(k) = JD(k);
%         end
%     end
% end
alphaExpZ = gradient(gyroz(:))./gradient(JD(:));

```

```

%% Clculo de energias -----
% Calculo de energia cinetica rotacional
Ukr = [];
[~,nnn] = size(gyroz');
for k = 1:nnn
    w = [gyrox(k),gyroy(k),gyroz(k)];
    Ukcomp = (w*d.inertia*w.)*0.5;
    Ukr(end + 1) = Ukcomp;
end
% Calculo de la energia potencial
Upr = [];
[~,nnn] = size(gyroz');
if week_no ~= 0
    for k = 1:nnn
        Upr(end + 1) = -Dot([mHystx_smoothed(k);mHysty_smoothed(k);0.7363],nonNmBody(:,k));
    end
else
    for k = 1:nnn
        Upr(end + 1) = -Dot([0;0;0.7363],nonNmBody(:,k));
    end
end
% Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
smoothed_Ukr = [];
smoothed_Upr = [];
window_size = window_size_gyros;
[~,nn] = size(gyroz');
for k = 1:nn

    % Obtener indice de inicio de ventana para media movil de punto k
    min_index = window_size/2 + 1;
    if (k < min_index)
        start_index = 1;
    else
        start_index = k - window_size/2;
    end

    % Obtener indice de final de ventana para media movil de punto k
    end_index = k + window_size/2;
    if (end_index > nn)
        end_index = nn;
    end

    % Calcular promedio de datos entre inicio y final de media movil
    % para obtener punto k suavizado
    smoothed_Ukr(end + 1) = mean(Ukr(start_index:end_index));
    smoothed_Upr(end + 1) = mean(Upr(start_index:end_index));
end
%% Graficado de torques externos actuando sobre Quetzal-1 -----

% Graficar todos los torques externos que existen sobre satellite
if graficar ==1
    h0 = figure;
    fontSize = 50;
    set(h0,'color','w');
    set(h0,'renderer','Painters')
    plot(tAero_filtered,'LineWidth',2);
    hold on;
    plot(tMag_filtered,'LineWidth',2);
end

```

```

hold on;
plot(tSolar_filtered,'LineWidth',2);
hold on;
plot(tDipole_filtered,'LineWidth',2);
hold on;
plot(tGravity_filtered,'LineWidth',2);
hold on;
grid on; grid minor;
xlim([0 n]);
grid on; grid minor;
xlabel('No. de beacons analizados');
ylabel('Torques en marco body (Nm)');
legend('Torque magntico estimado','Torque aerodinmico estimado','Torque por presin solar estimado','Torque aerodinmico estimado');
title('Torques externos e internos actuando sobre Quetzal-1');
if (week_no == 0)
    title('Torques externos e internos actuando sobre Quetzal-1');
else
    str = strcat('Torques externos e internos actuando sobre Quetzal-1 (Semana No.',num2str(week_no),')');
    title(str);
end
set(gca,'FontSize',15)
end
%% Graficacion de aceleraciones -----

% Graficar datos de aceleracion y aceleracion filtrada con medias moviles
if graficar == 1
    h1 = figure;
    set(h1,'color','w');
    set(h1,'renderer','Painters')
    subplot(2,2,[1 3])
    plot(alphas);
    hold on;
    plot(smoothed_alphas,'LineWidth',2,'color','r');
    hold on;
    line([0,n],[a_prom,a_prom],'LineWidth',1,'color','k','LineStyle','--');
    xlim([0 n]);
    grid on; grid minor;
    xlabel('No. de beacons analizados');
    ylabel('Aceleracin angular ( /s^2)');
    legend('Aceleracin angular estimada (Sin filtro)','Aceleracin angular estimada (Con filtro)','Aceleracin angular filtrada');
    if (week_no == 0)
        title('Aceleracin angular por torques externos e internos de Quetzal-1');
    else
        str = strcat('Aceleracin angular por torques externos e internos de Quetzal-1 (Semana No.',num2str(week_no),')');
        title(str);
    end
    end
    pos = get(gca, 'Position');
    pos(1) = 0.045;
    pos(3) = 0.45;
    set(gca, 'Position', pos)
    set(gca,'FontSize',15)
    % Graficar datos de velocidad angular
    subplot(2,2,2);
    plot(gyro_mag,'LineWidth',2,'color','b');
    hold on;
    plot(smoothed_gyro_mag,'LineWidth',2,'color','k');
    hold on;
    xlim([0 n]);
    ylim([0 15]);

```

```

grid on; grid minor;
xlabel('No. de beacons analizados');
ylabel('Velocidad angular (/s)');
title('Velocidad angular medida por el giroscopio de Quetzal-1');
legend('Velocidad angular medida por el giroscopio (sin filtro)', 'Velocidad angular medida por el giroscopio (con filtro)');
pos = get(gca, 'Position');
pos(1) = 0.55;
pos(3) = 0.41;
set(gca, 'FontSize', 15)
set(gca, 'Position', pos)

% Graficar datos de aceleracion angular filtrada
subplot(2,2,4);
plot(smoothed_alphas, 'LineWidth', 2, 'color', 'r');
hold on;
line([0,n], [a_prom, a_prom], 'LineWidth', 1, 'color', 'k', 'LineStyle', '--');
xlim([0 n]);
grid on; grid minor;
xlabel('No. de beacons analizados');
ylabel('Aceleracion angular (/s^2)');
title('Aceleracion angular por torques externos e internos sobre Quetzal-1');
legend('Aceleracion angular estimada (con filtro)', 'Aceleracion angular promedio (medida por el giroscopio)');
pos = get(gca, 'Position');
pos(1) = 0.55;
pos(3) = 0.41;
set(gca, 'FontSize', 15)
set(gca, 'Position', pos)
end

%% Graficado de component en x de torque aerodinmico actuando sobre Quetzal-1 y velocidad angular en x
if graficar == 1
h2 = figure;
set(h2, 'color', 'w');
set(h2, 'renderer', 'Painters')
% Graficar datos de velocidad angular en x
plot(tMFx_filtered, 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(tAerox_filtered, 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(tSolarx_filtered, 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(tGravityx_filtered, 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(smoothed_tx, 'LineWidth', 2);
hold on;
ylim([-15e-6 15e-6]); xlim([0 n]);
grid on; grid minor;
xlabel('No. de beacons analizados');
ylabel('Torques en marco body (Nm)');
% pos = get(gca, 'Position');
% pos(1) = 0.55;
% pos(3) = 0.41;
% set(gca, 'Position', pos)

% Graficar datos de velocidad angular en x
yyaxis right
ylabel('Velocidad angular en x (/s)');
plot(smoothed_gyrox, 'LineWidth', 2);
xlim([0 n]);

```

```

ylim([5 17]);
grid on; grid minor;
legend('Torque magntico estimado en x (con filtro)', 'Torque aerodinmico estimado en x (con filtro)', 'T
if (week_no == 0)
    title('Velocidad angular en x vs torques actuando en el eje x de Quetzal-1');
else
    str = strcat('Velocidad angular en x vs torques actuando en el eje x de Quetzal-1 (Semana No.', num2s
    title(str);
end
set(gca, 'FontSize', 15)
% pos = get(gca, 'Position');
% pos(1) = 0.55;
% pos(3) = 0.41;
% set(gca, 'Position', pos)
end
%% Graficado de component en y de torque aerodinmico actuando sobre Quetzal-1 y velocidad angular en y
if graficar == 1
    h3 = figure;
    set(h3, 'color', 'w');
    set(h3, 'renderer', 'Painters') % Graficar datos de velocidad angular en z
    plot(tMFy_filtered, 'LineWidth', 2);
    hold on;
    plot(tAeroy_filtered, 'LineWidth', 2);
    hold on;
    plot(tSolary_filtered, 'LineWidth', 2);
    hold on;
    plot(tGravityy_filtered, 'LineWidth', 2);
    hold on;
    plot(smoothed_ty, 'LineWidth', 2);
    hold on;
    xlim([0 n]);
    grid on; grid minor;
    xlabel('No. de beacons analizados');
    ylabel('Torques en marco body (Nm)');
    % pos = get(gca, 'Position');
    % pos(1) = 0.55;
    % pos(3) = 0.41;
    % set(gca, 'Position', pos)

    % Graficar datos de veloccidad angular en y
    yyaxis right
    ylabel('Velocidad angular en y (/s)');
    plot(smoothed_gyro, 'LineWidth', 2);
    xlim([0 n]);
    ylim([0 15]);
    grid on; grid minor;
    legend('Torque magntico estimado en y (con filtro)', 'Torque aerodinmico estimado en y (con filtro)', 'T
    if (week_no == 0)
        title('Velocidad angular en y vs torques actuando en el eje y de Quetzal-1');
    else
        str = strcat('Velocidad angular en y vs torques actuando en el eje y de Quetzal-1 (Semana No.', num2s
        title(str);
    end
    set(gca, 'FontSize', 15)
    % pos = get(gca, 'Position');
    % pos(1) = 0.55;
    % pos(3) = 0.41;
    % set(gca, 'Position', pos)
end
end

```

```

%% Graficado de component en z de torque aerodinmico actuando sobre Quetzal-1 y velocidad angular en z
if graficar == 1
    h4 = figure;
    set(h4,'color','w');
    set(h4,'renderer','Painters')
    % Graficar datos de velocidad angular en z
    plot(tMFz_filtered,'LineWidth',2);
    hold on;
    plot(tAeroz_filtered,'LineWidth',2);
    hold on;
    plot(tSolarz_filtered,'LineWidth',2);
    hold on;
    plot(tGravityz_filtered,'LineWidth',2);
    hold on;
    plot(smoothed_tz,'LineWidth',2);
    hold on;
    xlim([0 n]);
    grid on; grid minor;
    xlabel('No. de beacons analizados');
    ylabel('Torques en marco body (Nm)');
    % pos = get(gca, 'Position');
    % pos(1) = 0.55;
    % pos(3) = 0.41;
    % set(gca, 'Position', pos)

    % Graficar datos de torque aerodinmico en z
    yyaxis right
    ylabel('Velocidad angular en z (/s)');
    plot(smoothed_gyroz,'LineWidth',2);
    xlim([0 n]);
    ylim([0 15]);
    grid on; grid minor;
    legend('Torque magntico estimado en z (con filtro)', 'Torque aerodinmico estimado en z (con filtro)', 'T
    if (week_no == 0)
        title('Velocidad angular en z vs torques actuando en el eje z de Quetzal-1');
    else
        str = strcat('Velocidad angular en z vs torques actuando en el eje z de Quetzal-1 (Semana No.',num2s
        title(str);
    end
    set(gca,'FontSize',15)
    % pos = get(gca, 'Position');
    % pos(1) = 0.55;
    % pos(3) = 0.41;
    % set(gca, 'Position', pos)
end
% -----
%% Graficacion de velocidad angular en z dependiendo latitud
if graficar == 1
    % Inicializar figura
    h5 = figure;
    set(h5,'color','w');

    % ===== GRAFICA DE VELOCIDAD ANGULAR EN Z EN MAPAMUNDI =====

    % Generar mapa de colores dependiendo la velocidad angular en z
    map = [];
    color = gyroz - min(gyroz);
    for k = 1 : length(color)
        angle = color(k)/max(color);

```

```

    if (angle > 1)
        angle = 1;
    end
    map(end + 1, :) = [1,1 - angle,0];
end
color = gyroz;
magenta_col = 0:0.005:1;
col_bars = [ones(length(magenta_col),1), magenta_col', zeros(length(magenta_col),1)];
colormap(col_bars); % Configuracion de colorbar segun la
values = string(linspace(max(color),min(color),10));
% Graficar angulo entre Nadir vs. Eje -Z sobre mapamundi
subplot(2,1,2);
scatter(longitudes, latitudes, 24* ones(length(latitudes), 1), map, 'filled');
hold on;
cbh = colorbar('XTickLabel',values,'XTick', 0:1/(length(values)-1):1);
grid on; grid minor;
xlabel('Latitud []'); ylabel('Longitud []');
xlim([-160 190]); ylim([-65 80]);
hold on;
I = imread('mapamundi.png');
h = image([-160 190],[-65 -80],I);
uistack(h,'bottom');
title('Velocidad angular en el eje z');
hold on;
if (week_no == 0)
    title('Velocidad angular en el eje z');
else
    str = strcat('Velocidad angular en el eje z (Semana No.',num2str(week_no),')');
    title(str);
end
set(gca,'FontSize',15)
% pos = get(gca, 'Position');
% pos(1) = 0.060; pos(3) = 0.380;
% set(gca, 'Position', pos)

% ===== GRAFICA DE MAGNETOMETRO EN Z EN MAPAMUNDI =====

% Generar mapa de colores dependiendo el campo magntico en z
map2 = [];
color2 = mBody(3,:);
if max(color2) < 0 % Si el mximo de los datos es negati
    color2 = -color2;
end
color2 = color2 - min(color2); % Los datos comienzan en 0
for k = 1 : length(color2)
    angle2 = color2(k)/max(color2); % Se normalizan los datos
    map2(end + 1, :) = [1,1 - angle2,0]; % Los datos ms grandes sern de color
end
color2 = mBody(3,:);
magenta_col = 0:0.005:1;
col_bars = [ones(length(magenta_col),1), magenta_col', zeros(length(magenta_col),1)];
mincolor2 = 0;
maxcolor2 = 0;
if min(color2) < 0
    mincolor2 = max(color2);
    maxcolor2 = min(color2);
else
    mincolor2 = min(color2);
    maxcolor2 = max(color2);
end

```

```

end % Configuracion de colorbar segun la escala de color
values = string(linspace(maxcolor2,mincolor2,10));
% Graficar campo magntico en z sobre mapamundi
subplot(2,1,1);
scatter(longitudes, latitudes, 24* ones(length(latitudes), 1), map2, 'filled');
hold on;
cbh = colorbar('XTickLabel',values,'XTick', 0:1/(length(values)-1):1);
grid on; grid minor;
xlabel('Latitud []'); ylabel('Longitud []');
xlim([-160 190]); ylim([-65 80]);
hold on;
I = imread('mapamundi.png');
h = image([-160 190],[-65 -80],I);
uistack(h,'bottom');
title('Densidad de flujo magntico en el eje z');
hold on;

if (week_no == 0)
    title('Densidad de flujo magntico en el eje z');
else
    str = strcat('Densidad de flujo magntico en el eje z (Semana No.',num2str(week_no),')');
    title(str);
end
end
set(gca,'FontSize',15)
% pos = get(gca, 'Position');
% pos(1) = 0.060; pos(3) = 0.380;
% set(gca, 'Position', pos)

% ===== GRAFICA DE TORQUE AERODINMICO EN Z EN MAPAMUNDI =====

% Generar mapa de colores dependiendo el campo magntico en z
% map3 = [];
% color3 = tAeroz - min(tAeroz);
% OnetoCero = linspace(1,0,length(color3));
% for k = 1 : length(color3)
%     angle3 = color3(k)/max(color3);
%     if (angle3 > 1)
%         angle3 = 1;
%     end
%     map3(end + 1, :) = [1,1 - angle3,0];
% end
% magenta_col = 0:0.005:1;
% col_bars = [ones(length(magenta_col),1), magenta_col', zeros(length(magenta_col),1)];
% color3 = tAeroz;
% mincolor3 = 0;
% maxcolor3 = 0;
% if min(color3) < 0
%     mincolor3 = max(color3);
%     maxcolor3 = min(color3);
% else
%     mincolor3 = min(color3);
%     maxcolor3 = max(color3);
% end
% Configuracion de colorbar segun la escala de col
% values = string(linspace(maxcolor3,mincolor3,10));
% Graficar campo magntico en z sobre mapamundi
subplot(2,2,3);
scatter(longitudes, latitudes, 24* ones(length(latitudes), 1), map3, 'filled');
hold on;
cbh = colorbar('XTickLabel',values,'XTick', 0:1/(length(values)-1):1);

```

```

% grid on; grid minor;
% xlabel('Latitude []'); ylabel('Longitude []');
% xlim([-160 190]); ylim([-65 80]);
% hold on;
% I = imread('mapamundi.png');
% h = image([-160 190],[-65 -80],I);
% uistack(h,'bottom');
% title('Aerodinamic torque in the z axes');
% hold on;
%
% if (week_no == 0)
%     title('Aerodinamic torque in the z axes');
% else
%     str = strcat('Aerodinamic torque in the z axes (Week No.',num2str(week_no),')');
%     title(str);
% end
% pos = get(gca, 'Position');
% pos(1) = 0.060; pos(3) = 0.380;
% set(gca, 'Position', pos)

% ===== GRAFICA DE ACELERACION ANGULAR EN Z EN MAPAMUNDI =====

% Generar mapa de colores dependiendo el campo magntico en z
% map4 = [];
% color4 = alphaExpZ' - min(alphaExpZ');
% OnetoCero = linspace(1,0,length(color4));
% for k = 1 : length(color4)
%     angle4 = color4(k)/max(color4);
%     if (angle4 > 1)
%         angle4 = 1;
%     end
%     map4(end + 1, :) = [1,1 - angle4,0];
% end
% magenta_col = 0:0.005:1;
% col_bars = [ones(length(magenta_col),1), magenta_col', zeros(length(magenta_col),1)];
% color4 = alphaExpZ';
% mincolor4 = 0;
% maxcolor4 = 0;
% if min(color4) < 0
%     mincolor4 = max(color4);
%     maxcolor4 = min(color4);
% else
%     mincolor4 = min(color4);
%     maxcolor4 = max(color4);
% end
%                                     % Configuracion de colorbar segun la escala de col
% values = string(linspace(maxcolor4,mincolor4,10));
% % Graficar campo magntico en z sobre mapamundi
% subplot(2,2,4);
% scatter(longitudes, latitudes, 24* ones(length(latitudes), 1), map4, 'filled');
% hold on;
% cbh = colorbar('XTickLabel',values,'XTick', 0:1/(length(values)-1):1);
% grid on; grid minor;
% xlabel('Latitude []'); ylabel('Longitude []');
% xlim([-160 190]); ylim([-65 80]);
% hold on;
% I = imread('mapamundi.png');
% h = image([-160 190],[-65 -80],I);
% uistack(h,'bottom');
% title('Experimental angular acceleration in the z axes');

```

```

% hold on;
% % pos = get(gca, 'Position');
% % pos(1) = 0.060; pos(3) = 0.380;
% % set(gca, 'Position', pos)

% ===== GRAFICA DE NGULO ENTRE C. MAGNTICO Y EJE Z EN MAPAMUNDI =====

% Generar mapa de colores dependiendo del ngulo entre el campo magntico y
% el eje z
% map5 = [];
% color5 = anglesMZ;
% if max(color5) < 0 % Si el mximo de los datos es nega
% color5 = -color5;
% end
% color5 = anglesMZ - min(anglesMZ); % Los datos comienzan en 0
% for k = 1 : length(color5)
% angle5 = color5(k)/max(color5);
% map5(end + 1, :) = [1, 1 - angle5, 0];
% end
% color5 = anglesMZ;
% magenta_col = 0:0.005:1;
% col_bars = [ones(length(magenta_col),1), magenta_col', zeros(length(magenta_col),1)];
% colormap(col_bars); % Configuracion de colorbar segun
% values = string(linspace(max(color5),min(color5),10));
% % Graficar campo magntico en z sobre mapamundi
% subplot(2,2,4);
% scatter(longitudes, latitudes, 24* ones(length(latitudes), 1), map5, 'filled');
% hold on;
% cbh = colorbar('XTickLabel',values,'XTick', 0:1/(length(values)-1):1);
% grid on; grid minor;
% xlabel('Latitude []'); ylabel('Longitude []');
% xlim([-160 190]); ylim([-65 80]);
% hold on;
% I = imread('mapamundi.png');
% h = image([-160 190],[-65 -80],I);
% uistack(h,'bottom');
% title('Angle between the magnetic field and the z axes');
% hold on;
% if (week_no == 0)
% title('Angle between the magnetic field and the z axes');
% else
% str = strcat('Angle between the magnetic field and the z axes (Week No.',num2str(week_no),')');
% title(str);
% end
% pos = get(gca, 'Position');
% pos(1) = 0.060; pos(3) = 0.380;
% set(gca, 'Position', pos)

% ===== GENERAR UN EXCEL CON LA DATA NECESARIA PARA EL ANALISIS =====
% ===== DE TORQUES EXTERNOS =====
% magnetox = mECI_to_b(1,:);
% magnetoy = mECI_to_b(2,:);
% magnetoz = mECI_to_b(3,:);
% tAerox = tAerox';
% tAeroy = tAeroy';
% tAeroz = tAeroz';
% folde = '/Users/quiebres/Documents/IvanMaldonado/UVG/OctavoSemestre/TrabajoDeGraduacion/Data (Weekly)
% name =
% name =

```

```

    % df = table(tAerox, tAeroy, tAeroz, gyrox, gyroy, gyroz, magnetox, magnetoy, magnetoz, latitudes, long
    % writetable(df, 'ejeZ.xlsx');
end
%% Grfica de ngulo entre campo magntico y componentes del satlite (ACMC)
if graficar == 1
    h6 = figure;
    set(h6,'color','w');
    set(h6,'renderer','Painters')
    % Graficar datos de velocidad angular en z
    subplot(1,1,1);
    plot(anglesMX,'LineWidth',2);
    hold on;
    plot(anglesMY,'LineWidth',2);
    hold on;
    plot(anglesMZ,'LineWidth',2);
    hold on;
    xlim([0 n]);
    grid on; grid minor;
    xlabel('No. de beacons analizados');
    ylabel('ngulo entre componentes (sin filtro) []');
    legend('ngulo con respecto al eje x','ngulo con respecto al eje y','ngulo con respecto al eje z');
    title('ngulo entre la densidad de flujo magntico y el eje respectivo de Quetzal-1');
    hold on;
    if (week_no == 0)
        title('ngulo entre la densidad de flujo magntico y el eje respectivo de Quetzal-1');
    else
        str = strcat('ngulo entre la densidad de flujo magntico y el eje respectivo de Quetzal-1 (Semana No.
        title(str);
    end
    set(gca,'FontSize',15)
    % pos = get(gca, 'Position');
    % pos(1) = 0.55;
    % pos(3) = 0.41;
    % set(gca, 'Position', pos)
end
%% Doble grfica para comparacin de velocidad angular y ngulo de componentes magnticas
if graficar == 1
    h7 = figure;
    set(h7,'color','w');
    set(h7,'renderer','Painters')
    % Grfica para comparacin de w en z con el ngulo entre el eje z y el
    % campo magntico
    % Graficar angulos
    plot(smoothed_anglesMX)
    hold on;
    plot(smoothed_anglesMY)
    hold on;
    plot(smoothed_anglesMZ)
    hold on;
    xlabel('No. de beacons analizados')
    ylabel('ngulo entre densidad de flujo magntico y eje respectivo (con filtro) []')
    % Graficar datos de w en z
    yyaxis right
    ylabel('Velocidad angular en el eje z (con filtro) [/s]')
    plot(smoothed_gyroz)

    legend('ngulo con respecto al eje x', 'ngulo con respecto al eje y', 'ngulo con respecto al eje z', 'Ve
    title('Comparasin del ngulo entre densidad de flujo magntico y eje respectivo (con filtro) con la veloci
    hold on;

```

```

    if (week_no == 0)
        title('Comparasin del ngulo entre densidad de flujo magntico y eje respectivo con la velocidad angu
    else
        str = strcat('Comparasin del ngulo entre densidad de flujo magntico y eje respectivo con la velocidad
        title(str);
    end
    set(gca,'FontSize',15)
end
[R_anglezMX_gyroz,P_anglezMX_gyroz] = corrcoef(smoothed_gyroz,smoothed_anglesMX);
[R_anglezMY_gyroz,P_anglezMY_gyroz] = corrcoef(smoothed_gyroz,smoothed_anglesMY);
[R_anglezMZ_gyroz,P_anglezMZ_gyroz] = corrcoef(smoothed_gyroz,smoothed_anglesMZ);
fprintf('For the angle between the magnetic field and the x axis and the angular velocity in z, the sample
fprintf('The p-value, with a significance level of 0.05, is %f\n',P_anglezMX_gyroz(2,1));
fprintf('For the angle between the magnetic field and the y axis and the angular velocity in z, the sample
fprintf('The p-value, with a significance level of 0.05, is %f\n',P_anglezMY_gyroz(2,1));
fprintf('For the angle between the magnetic field and the z axis and the angular velocity in z, the sample
fprintf('The p-value, with a significance level of 0.05, is %f\n',P_anglezMZ_gyroz(2,1));
%% Doble grfica para comparacin de velocidad angular y componentes magnticas
if graficar == 1
    % Grfica
    h8 = figure;
    set(h8,'color','w');
    set(h8,'renderer','Painters')
    % Filtro ventana de medias moviles para suavizar datos
    % Graficar datos de w en z

    plot(smoothed_mBodyx)
    hold on;
    plot(smoothed_mBodyy)
    hold on;
    plot(smoothed_mBodyz)
    hold on;
    ylabel('Componentes de densidad de flujo magntico (con filtro) (T)')
    xlabel('No. de beacons analizados')
    yyaxis right
    ylabel('Velocidad angular en el eje z (con filtro) (/s)')
    plot(smoothed_gyroz)

    title('Comparasin de componentes de densidad de flujo magntico con velocidad angular en el eje z');
    hold on;
    if (week_no == 0)
        title('Magnetic field components and angular velocity in z comparison');
    else
        str = strcat('Magnetic field components and angular velocity in z comparison (Week No.',num2str(week
        title(str);
    end
    legend('Magnetic Field in x', 'Magnetic Field in y', 'Magnetic Field in z', 'Angular velocity in the z c
    set(gca,'FontSize',15)
end

[R_mBodyx_gyroz,P_mBodyx_gyroz] = corrcoef(smoothed_mBodyx,smoothed_gyroz);
[R_mBodyy_gyroz,P_mBodyy_gyroz] = corrcoef(smoothed_mBodyy,smoothed_gyroz);
[R_mBodyz_gyroz,P_mBodyz_gyroz] = corrcoef(smoothed_mBodyz,smoothed_gyroz);
fprintf('For the magnetic field in x and the angular velocity in z, the sample correlation coefficient is %
fprintf('The p-value, with a significance level of 0.05, is %f\n',P_mBodyx_gyroz(2,1));
fprintf('For the magnetic field in y and the angular velocity in z, the sample correlation coefficient is %
fprintf('The p-value, with a significance level of 0.05, is %f\n',P_mBodyy_gyroz(2,1));
fprintf('For the magnetic field in z and the angular velocity in z, the sample correlation coefficient is %
fprintf('The p-value, with a significance level of 0.05, is %f\n',P_mBodyz_gyroz(2,1));

```

```

%X = ['For the magnetic field in the z axis and the angular velocity in',...
      '% z, the sample correlation coefficient is ',R_mBody_gyroz(2,1), ...
      '% and the p-value, with a significance level of 0.05, is ',...
      %P_mBody_gyroz(2,1)];
%disp(X)

%% Doble grafica para comparacin de campo magntico en z y ngulo entre el campo y el satlite
if graficar == 1
    h9 = figure;
    set(h9,'color','w');
    set(h9,'renderer','Painters')
    % Grfica para comparacin de w en z con el ngulo entre el eje z y el
    % campo magntico

    plot(smoothed_mBodyx)
    hold on;
    plot(smoothed_mBodyy)
    hold on;
    plot(smoothed_mBodyz)
    hold on;
    ylabel('Componentes de densidad de flujo magntico (con filtro) (T)')
    xlabel('No. de beacons analizados')

    yyaxis right
    ylabel('ngulo entre el vector de densidad de flujo magntico y el eje z []')
    plot(smoothed_anglesMZ)
    legend('Densidad de flujo magntico en el eje x', 'Densidad de flujo magntico en el eje y', 'Densidad de flujo magntico en el eje z')
    title('Comparacin de densidades de flujo magntico con ngulo de densidad de flujo magntico con respecto a z')
    hold on;
    if (week_no == 0)
        title('Comparacin de densidades de flujo magntico con ngulo de densidad de flujo magntico con respecto a z')
    else
        str = strcat('Comparacin de densidades de flujo magntico con ngulo de densidad de flujo magntico con respecto a z');
        title(str);
    end
    set(gca,'FontSize',15)
end

[R_mBody_AngleX,P_mBody_AngleX] = corrcoef(smoothed_mBodyx,smoothed_anglesMZ);
[R_mBody_AngleY,P_mBody_AngleY] = corrcoef(smoothed_mBodyy,smoothed_anglesMZ);
[R_mBody_AngleZ,P_mBody_AngleZ] = corrcoef(smoothed_mBodyz,smoothed_anglesMZ);
fprintf('For the angle between the magnetic field and the z axis and the magnetic field in x, the sample correlation coefficient is ',R_mBody_AngleX(2,1));
fprintf('The p-value, with a significance level of 0.05, is %f\n',P_mBody_AngleX(2,1));
fprintf('For the angle between the magnetic field and the z axis and the magnetic field in y, the sample correlation coefficient is ',R_mBody_AngleY(2,1));
fprintf('The p-value, with a significance level of 0.05, is %f\n',P_mBody_AngleY(2,1));
fprintf('For the angle between the magnetic field and the z axis and the magnetic field in z, the sample correlation coefficient is ',R_mBody_AngleZ(2,1));
fprintf('The p-value, with a significance level of 0.05, is %f\n',P_mBody_AngleZ(2,1));

%X = ['For the magnetic field in the z axis and the angle between the', ...
      '% magnetic field and the z axis, the sample correlation', ...
      '% coefficient is ',R_mBody_AngleZ(2,1), ' and the p-value, with a', ...
      '% significance level of 0.05, is ', P_mBody_AngleZ(2,1)];
%disp(X)

%% Doble grafica para comparacin de energia cinetica rotacional y energia potencial rotacional del satlite
if graficar == 1
    h10 = figure;
    set(h10,'color','w');
    set(h10,'renderer','Painters')
    % Grfica para comparacin de w en z con el ngulo entre el eje z y el

```

```

    % campo magntico
    plot(smoothed_Ukr)
    hold on;
    plot(smoothed_Upr)
    hold on;
    ylabel('Energia (con filtro) (J)')
    xlabel('No. de beacons analizados')
    legend('Energia cintica rotacional', 'Energia potencial rotacional')
    title('Comparasin de energia cintica rotacional y potencial rotacional');
    hold on;
    if (week_no == 0)
        title('Comparasin de energia cintica rotacional y potencial rotacional');
    else
        str = strcat('Comparasin de energia cintica rotacional y potencial rotacional (Semana No.', num2str(w
        title(str);
    end
    set(gca, 'FontSize', 15)
end
%% Doble grfica para comparacin de w en x, y con w en z del satlite
if graficar == 1
    h11 = figure;
    set(h11, 'color', 'w');
    set(h11, 'renderer', 'Painters')
    % Grfica para comparacin de w en z con el ngulo entre el eje z y el
    % campo magntico
    plot(smoothed_gyrox)
    hold on;
    plot(smoothed_gyroxy)
    hold on;
    plot(smoothed_gyroz)
    hold on;
    ylabel('Componentes de la velocidad angular (/s)')
    xlabel('No. de beacons analizados')
    legend('Velocidad angular en el eje x (con filtro)', 'Velocidad angular en el eje y (con filtro)', 'Velocidad angular en el eje z (con filtro)')
    title('Comparasin de velocidades angulares');
    hold on;
    if (week_no == 0)
        title('Comparasin de velocidades angulares');
    else
        str = strcat('Comparasin de velocidades angulares (Semana No.', num2str(week_no), ')');
        title(str);
    end
    set(gca, 'FontSize', 15)
end

[R_gyroz_gyrox, P_gyroz_gyrox] = corrcoef(smoothed_gyroz, smoothed_gyrox);
[R_gyroz_gyroxy, P_gyroz_gyroxy] = corrcoef(smoothed_gyroz, smoothed_gyroxy);
fprintf('For the angular velocity in x and the angular velocity in z, the sample correlation coefficient is %f\n', P_gyroz_gyrox(2,1));
fprintf('The p-value, with a significance level of 0.05, is %f\n', P_gyroz_gyrox(2,1));
fprintf('For the angular velocity in y and the angular velocity in z, the sample correlation coefficient is %f\n', P_gyroz_gyroxy(2,1));
fprintf('The p-value, with a significance level of 0.05, is %f\n', P_gyroz_gyroxy(2,1));

%% Grfica de intento de curva de histresis del satlite
if graficar == 1 && week_no ~= 0
    h12 = figure;
    set(h12, 'color', 'w');
    set(h12, 'renderer', 'Painters')
    % Grfica para comparacin de w en z con el ngulo entre el eje z y el
    % campo magntico

```

```

subplot(2,1,1)
plot(sort(Hax_filtered),hystRx_smoothed)
hold on;
plot(sort(Hax_filtered),hystLx_smoothed)
hold on;
ylabel('Densidad de flujo magntico en la barra de histresis (con filtro) (T)')
xlabel('Campo magntico de la tierra paralelo a la barra (con filtro) (A/m)')
title('Curva de histresis en el eje x');
hold on;
if (week_no == 0)
    title('Curva de histresis en el eje x');
else
    str = strcat('Curva de histresis en el eje x (Semana No.',num2str(week_no),')');
    title(str);
end
set(gca,'FontSize',10)

subplot(2,1,2)
plot(sort(Hay_filtered),hystRy_smoothed)
hold on;
plot(sort(Hay_filtered),hystLy_smoothed)
hold on;
ylabel('Densidad de flujo magntico en la barra de histresis (con filtro) (T)')
xlabel('Campo magntico de la tierra paralelo a la barra (con filtro) (A/m)')
title('Curva de histresis en el eje y');
hold on;
if (week_no == 0)
    title('Curva de histresis en el eje y');
else
    str = strcat('Curva de histresis en el eje y (Semana No.',num2str(week_no),')');
    title(str);
end
set(gca,'FontSize',10)
end
%% Data final-Promedios de datos relevantes
if week_no ~= 0
    % Se revisa que los datos sigan una distribucion normal
    % Si el valor de jbtest es 0 -> se sigue una distribucion normal
    % Si el valor de jbtest es 1 -> no se sigue una distribucion normal
    vx_normal = jbtest(smoothed_gyrox);
    vy_normal = jbtest(smoothed_gyroxy);
    vz_normal = jbtest(smoothed_gyroz);
    Bhystx_normal = jbtest(Bhystx_smoothed);
    Bhysty_normal = jbtest(Bhysty_smoothed);
    % Se obtienen los valores promedio y las desviaciones estandard de las
    % variables a analizar.
    vx_prom = mean(smoothed_gyrox);
    vx_std = std(smoothed_gyrox);
    vy_prom = mean(smoothed_gyroxy);
    vy_std = std(smoothed_gyroxy);
    % Asumiendo aceleracin constante
    % Calculo de aceleracion promedio observada por giroscopios de Quetzal-1
    [w_i_z,idx_min_z] = min(smoothed_gyroz); % Velocidad angular minima en primera s
    [w_f_z,idx_max_z] = max(smoothed_gyroz); % Velocidad angular maxima hasta la fech
    if (idx_min_z < idx_max_z)
        a_prom_z = (w_f_z - w_i_z)/dT; % Aceleracion angular promedio medida p
    else
        a_prom_z = -(w_f_z - w_i_z)/dT; % Desaceleracion angular promedio medi
    end
end

```

```

vz_prom = mean(smoothed_gyroz);
vz_std = std(smoothed_gyroz);
Bhystx_prom = mean(Bhystx_smoothed);
Bhystx_std = std(Bhystx_smoothed);
Bhysty_prom = mean(Bhysty_smoothed);
Bhysty_std = std(Bhysty_smoothed);
% Se guardan nuevamente las correlaciones entre las velocidades angular
% de x & y con z
Rvx = R_gyroz_gyrox(2,1);
Pvx = P_gyroz_gyrox(2,1);
Rvy = R_gyroz_gyroy(2,1);
Pvy = P_gyroz_gyroy(2,1);
% Se genera el excel donde se guardaran estas variables
filename = 'problemaAlphaQuetzal1.xlsx';
% Se guardan las variables en un data frame
df = table(vx_normal, vx_prom, vx_std, Rvx, Pvx, vy_normal, vy_prom,...
    vy_std, Rvy, Pvy, vz_normal, vz_prom, vz_std, Bhystx_normal,...
    Bhystx_prom, Bhystx_std, Bhysty_normal, Bhysty_prom, Bhysty_std,...
    a_prom_z);
if week_no == 1
    writetable(df, filename, 'Range', strcat('A',string(week_no)));
else
    writetable(df, filename, 'Range', strcat('A',string(week_no + 1)), 'WriteVariableNames', false);
end
end
end

```

## A.2. Quetzal1\_Distrubance\_Mean\_Analyzer.m

```

%% Parametros de configuracin para analisis total -----
% Paths de documentos que contienen data (cambiar dependiendo computadora)
direction = '/Users/quiebres/Documents/IvanMaldonado/UVG/OctavoSemestre/TrabajoDeGraduacion/Quetzal-1 Analy
name = 'problemaAlphaQuetzal1.xlsx';
file_name = strcat(direction,name);
%% Extraccion de datos de telemetria resumida -----
[telemetry, headers, ~] = xlsread(file_name); % Extraer toda la telemetria resumida r
start_ = 2;
end_ = size(telemetry,1);
vx_weekly = telemetry(start_:end_,2); % Separar data correspondiente a Wx prom
vx_sdt_weekly = telemetry(start_:end_,3); % Separar data correspondiente a Wx std
vx_corr_weekly = telemetry(start_:end_,4); % Separar data correspondiente a Wx con
vy_weekly = telemetry(start_:end_,7); % Separar data correspondiente a Wy prom
vy_sdt_weekly = telemetry(start_:end_,8); % Separar data correspondiente a Wy std
vy_corr_weekly = telemetry(start_:end_,9); % Separar data correspondiente a Wy con
vz_weekly = telemetry(start_:end_,12); % Separar data correspondiente a Wz prom
vz_sdt_weekly = telemetry(start_:end_,13); % Separar data correspondiente a Wz std
Bhystx_weekly = telemetry(start_:end_,15); % Separar data correspondiente a promed
Bhystx_sdt_weekly = telemetry(start_:end_,16); % Separar data correspondiente a std de
Bhysty_weekly = telemetry(start_:end_,18); % Separar data correspondiente a promed
Bhysty_sdt_weekly = telemetry(start_:end_,19); % Separar data correspondiente a std de
az_weekly = telemetry(start_:end_,20); % Separar data correspondiente a la ace
weekly = linspace(start_, end_, length(az_weekly));
%% Creacion de mapa de color para velocidad en z promedio
mapz = [];
colorz = az_weekly';
if max(colorz) < 0 % Si el mximo de los datos es negativo,

```

```

    colorz = -colorz;
end
colorz = az_weekly' - min(az_weekly'); % Los datos comienzan en 0
for k = 1 : length(colorz)
    anglez = colorz(k)/max(colorz);
    mapz(end + 1, :) = [1, anglez, 0];
end
colorz = az_weekly';
amarillo_col = 0:0.005:1;
col_bars = [ones(length(amarillo_col),1), amarillo_col', zeros(length(amarillo_col),1)];

%% plot de barras de error de campo magntico generado por las barras semanalmente
hm1 = figure();
set(hm1,'color','w');
set(hm1,'renderer','Painters')
% Subgrafica de flujo de campo magnetico en x
subplot(2,1,1)
% Graficar velocidad angular en el mapa mundi
scatter(weekly , Bhystx_weekly', 75* ones(length(Bhystx_weekly), 1), mapz, 'filled');
hold on;
colormap(col_bars); % Configuracion de colorbar segun la es
values = string(linspace(min(colorz),max(colorz),10));
cbh = colorbar('XTickLabel',values,'XTick', 0:1/(length(values)-1):1);
hold on;
errorbar(weekly, Bhystx_weekly, Bhystx_sdt_weekly)
hold on;
title('Relacin de flujo de campo magntico en las barras de histresis en el eje x con la aceleracin angular
xlabel('Semana')
ylabel('Flujo de campo magntico promedio en las barras en eje x (T)')
set(gca,'FontSize',15)
subplot(2,1,2)
% Graficar velocidad angular en el mapa mundi
scatter(weekly , Bhysty_weekly', 75* ones(length(Bhysty_weekly), 1), mapz, 'filled');
hold on;
cbh = colorbar('XTickLabel',values,'XTick', 0:1/(length(values)-1):1);
hold on;
errorbar(weekly, Bhysty_weekly,Bhysty_sdt_weekly)
hold on;
title('Relacin de flujo de campo magntico en las barras de histresis en el eje y con la aceleracin angular
xlabel('Semana')
ylabel('Flujo de campo magntico promedio en las barras en eje y (T)')
set(gca,'FontSize',15)
%% plot de barras de error de velocidad angular en x & y semanalmente
hm2 = figure();
set(hm2,'color','w');
set(hm2,'renderer','Painters')
% Subgrafica de flujo de campo magnetico en x
subplot(2,1,1)
% Graficar velocidad angular en el mapa mundi
scatter(weekly , vx_weekly', 75* ones(length(vx_weekly), 1), mapz, 'filled');
hold on;
colormap(col_bars); % Configuracion de colorbar segun la es
values = string(linspace(min(colorz),max(colorz),10));
cbh = colorbar('XTickLabel',values,'XTick', 0:1/(length(values)-1):1);
hold on;
errorbar(weekly, vx_weekly, vx_sdt_weekly)
hold on;
title('Relacin de velocidad angular en el eje x con la aceleracin angular en z')
xlabel('Semana')

```

```

ylabel('velocidad angular promedio en el eje x (/s)')
set(gca,'FontSize',15)
subplot(2,1,2)
% Graficar velocidad angular en el mapa mundi
scatter(weekly , vy_weekly', 75* ones(length(vy_weekly), 1), mapz, 'filled');
hold on;
cbh = colorbar('XTickLabel',values,'XTick', 0:1/(length(values)-1):1);
hold on;
errorbar(weekly, vy_weekly,vy_sdt_weekly)
hold on;
title('Relacin de velocidad angular en el eje y con la aceleracin angular en z')
xlabel('Semana')
ylabel('velocidad angular promedio en el eje y (/s)')
set(gca,'FontSize',15)

```

---

### A.3. hystCurve.m

---

```

function [hystL, hystR, Bhyst] = hystCurve(Bs,Br,Hc,Ha,D,L)
hystL = []
hystR = []

k0 = 1/Hc * tan((pi*Br)/(2*Bs));
for i = 1:length(Ha)
    hystL(end + 1) = (2/pi)*Bs*atan(k0*(Ha(i) + Hc));
    hystR(end + 1) = (2/pi)*Bs*atan(k0*(Ha(i) - Hc));
end
switch1 = 0;
Bhyst = [hystR(1)];
for i = 2:(length(Ha))
    if switch1 == 0
        Bhyst(end+1) = hystR(i);
        if Bhyst(i) >= Bs
            switch1 = 1;
        end
    elseif switch1 == 1
        Bhyst(end+1) = hystL(i);
        if Bhyst(i) <= -Bs
            switch1 = 0;
        end
    end
end
hystL = []
hystR = []
sortHa = sort(Ha)
for i = 1:length(Ha)
    hystL(end + 1) = (2/pi)*Bs*atan(k0*(sortHa(i) + Hc));
    hystR(end + 1) = (2/pi)*Bs*atan(k0*(sortHa(i) - Hc));
end
end

```

---

${}^B\mathbf{L}_D$	Torque aerodinámico
${}^B\mathbf{L}_G$	Torque por gradiente gravitatorio
${}^B\mathbf{L}_M$	Torque por campo magnético de la Tierra
${}^B\mathbf{L}_{SP}$	Torque por presión solar
${}^B\mathbf{m}$	Momento magnético del satélite
$[I]$	Matriz de momento de inercia del satélite
$\mathbf{H}$	Campo magnético
$\mathbf{M}$	Magnetización del material ferromagnético
$\mu_e$	Parámetro gravitacional de la Tierra
$\rho$	Densidad atmosférica de la Tierra
${}^B\mathbf{B}$	Densidad de flujo de campo magnético de la tierra
${}^B\mathbf{F}_{SP}$	Fuerza por presión solar
${}^B\mathbf{R}_c$	Vector desde el centro de la Tierra hasta el centro de masa del satélite
${}^B\mathbf{S}$	Factor de desmagnetización
${}^B\mathbf{s}$	Vector unitario de la Tierra al Sol
${}^B\mathbf{V}$	Vector de velocidad del satélite
$B_r$	Remanencia
$B_s$	Saturación
$C_d$	Coefficiente de arrastre del satélite
$c_r$	Coefficiente de reflectividad del satélite
$H_c$	Fuerza coercitiva
$H_d$	Campo de desmagnetización
$N_d$	Factor de desmagnetización
$P_s$	Presión solar en la Tierra