
Modelo de temperatura vs posición para el Quetzal-1

Pablo Josue Noack Cajbon



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



Modelo de temperatura vs posición para el Quetzal-1

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Pablo Josue Noack Cajbon
para optar al grado académico de Licenciado en Física

Guatemala,
2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



Modelo de temperatura vs posición para el Quetzal-1

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por
Pablo Josue Noack Cajbon
para optar al grado académico de Licenciado en Física

Guatemala,
2021

Vo.Bo.:



(f)

Sergio Minera PhD

(f)



Dan Alvarez Ing.

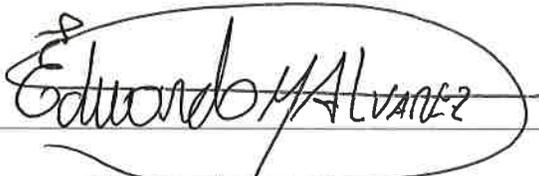
Tribunal Examinador:



(f)

Sergio Minera PhD

(f)



Eduardo Alvarez MSc

(f)



Irene Aguilar MSc

Fecha de aprobación: Guatemala, 06 de diciembre de 2021.

Agradecimientos

A la primera persona que quisiera darle mis agradecimientos es a mi madre, quien con su objetividad y su sabiduría siempre me aconsejó, siempre me apoyó, y creyó en mí y mi potencial. Siempre estuvo conmigo, los días que lejos de casa extrañaba a todos, sentía que me había fallado a mí mismo y no quería nada más que arrojar la toalla. Ella siempre ha sido un ejemplo para mí, demostrándome qué es ser una buena y correcta persona en la vida. A otra persona que agradezco mucho es a mi hermano quien me dio una nueva perspectiva para la vida, lo que significa el amor y saber que cada sacrificio que hacemos siempre trae una recompensa más grande. Por otro lado agradezco a mis tías, tíos y abuela quienes me apoyaron llegando a ayudarme con la limpieza de mi apartamento, llevándome comida o simplemente haciéndome compañía.

También quiero agradecer a mi directora de carrera Zaidy Urrutia quien siempre buscó apoyarnos en todo con ese altruismo que la caracteriza tan bien. Por último quiero agradecer a Dan Isai Alvarez y a Sergio Minera, por haber sido mis asesores a pesar de la gran crisis mundial que se vive actualmente, por haber destinado tiempo de sus vidas que pudieron haber dedicado a su trabajo o a sus seres queridos para poder ayudarme en mi trabajo de tesis durante todos estos meses, y siempre con la buena disposición que a ambos caracteriza para brindarme el apoyo que necesité siempre.

Finalmente, quiero agradecer a Iván Maldonado, mi compañero de carrera, por haberme enseñado mucho a partir de su responsabilidad, respeto y sinceridad, agradezco haber tenido un compañero para la tesis como él.

Agradecimientos	III
Lista de figuras	VII
Resumen	VIII
1. Introducción	1
2. Objetivos	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
2.3. Resultados esperados	2
3. Justificación	3
4. Marco teórico	4
4.1. Transmisión de calor	4
4.1.1. Formas de transmisión de calor	5
4.1.2. Modelo implementado	6
4.2. Mecánica orbital	7
4.2.1. Marcos de referencia	7
4.2.2. Cuaterniones	8
4.2.3. Problema restringido de dos cuerpos	9
4.2.4. Ángulo beta	11
4.2.5. Perturbaciones orbitales	11
4.3. Satélites en órbitas bajas	13
4.3.1. Características	13
4.3.2. Fuentes de calor	14
4.4. CubeSat Toolbox	15
4.4.1. Princeton Satellite System´s CubeSat Toolbox	15
5. Antecedentes	17
6. Metodología	18
6.1. Definición de la misión	18
6.1.1. Fuentes de calor externas	19
6.2. Modelo térmico	19
6.3. Estudio del modelo	20

6.4. Implementación del modelo en Matlab	21
6.4.1. Precómputo de distancias	21
6.4.2. Cálculo de temperaturas	21
6.4.3. Estudio de distintos casos del modelo principal	22
7. Resultados	23
7.1. Temperaturas medidas por el Quetzal-1	23
7.2. Datos obtenidos mediante el simulador	25
7.2.1. Simulación de la temperatura	25
8. Discusión	41
8.1. Comportamiento térmico del Quetzal-1	41
8.2. Comportamiento térmico predicho mediante la simulación	42
8.2.1. Efecto de la modificación de las variables ópticas en el modelo	42
8.2.2. Efecto del uso de distintos sistemas de referencia	42
8.2.3. Efectos del factor del albedo en el modelo térmico	43
8.2.4. Efectos del giro en la simulación térmica del Quetzal-1	43
8.2.5. Comparación de la simulación térmica y la temperatura real	43
9. Conclusiones	45
10.Recomendaciones	46
11.Bibliografía	47
12.Anexos	49
13.Glosario	50

Lista de figuras

1. Sistema bodyframe para el Quetzal 1.	8
2. Representación del ángulo beta.	11
3. Variación anual del albedo.	19
4. Temperaturas medidas por los sensores de temperatura a bordo del Quetzal-1, la figura superior representa la variación de temperatura del satélite, a lo largo del tiempo y la figura inferior, el comportamiento de las temperaturas en un rango de aproximadamente 4 días.	24
5. Temperatura promedio de las temperaturas medidas por los sensores de temperatura a bordo del Quetzal-1 (BNO Y BNO055). Donde la figura superior representa la variación de temperatura del satélite a lo largo del tiempo, mientras que la figura inferior es el comportamiento del promedio de las temperaturas medidas por los sensores de temperatura a bordo del Quetzal-1 en un rango de, aproximadamente, 4 días.	25
6. Efectos de la variación de la constante epsilon (emisividad) en el modelo.	26
7. Efectos de la variación de la constante alpha (absorbancia) en el modelo.	27
8. Efectos de la variación de la constante Cp (Calor específico) en el modelo.	28
9. Comparación de dos simulaciones de la temperatura del satélite asumiendo que el sistema de referencia del Quetzal-1 está alineado al sistema LVLH y al campo magnético de la tierra.	29
10. Comparación de dos simulaciones de la temperatura del satélite, asumiendo que el sistema de referencia del Quetzal-1 está alineado al sistema LVLH y al campo magnético de la tierra con la temperatura promedio del Quetzal-1.	30
11. Variación del factor del albedo entre 0 a 1	31
12. Variación del modelo térmico para el Quetzal-1, asumiendo que este gira en sus tres ejes cartesianos, a distintas velocidades angulares.	32
13. Variación del modelo térmico para el Quetzal-1, asumiendo que este gira en sus tres ejes cartesianos, a distintas velocidades angulares, entre -23 a 23 grados. Se utilizó este rango dado que se determinó que las velocidades angulares, medidas por el Quetzal-1, se encontraban entre estos rangos.	33
14. Simulación de la temperatura del Quetzal-1, tomando en cuenta solamente el efecto del flujo solar.	34
15. Simulación de la temperatura del Quetzal-1, tomando en cuenta el efecto del flujo solar y el albedo.	35
16. Simulación de la temperatura del Quetzal-1 tomando en cuenta el efecto del flujo solar, el albedo y el giro del satélite.	36

17. Comparación entre las tres simulaciones de la temperatura del Quetzal-1, asumiendo que las constantes ópticas de la superficie del Quetzal-1 son las pertenecientes al panel solar.	37
18. Comparación entre las tres simulaciones de la temperatura del Quetzal-1, asumiendo que las constantes ópticas de la superficie del Quetzal-1 son los promedios ponderados que conforman dicha superficie	38
19. Comparación de la temperatura real con la temperatura simulada, tomando en cuenta el albedo y el giro y las constantes ópticas como las del panel solar.	39
20. Comparación de la temperatura real con la temperatura simulada, tomando en cuenta el albedo y el giro y las constantes ópticas, así como el promedio ponderado de los materiales que conforman la superficie del Quetzal-1	40

Se propuso un modelo isotérmico para la predicción de la temperatura del Quetzal-1, puesto que es un modelo relativamente sencillo y, por lo tanto, no emplea muchos recursos computacionales, siendo un punto de partida para futuros modelos más robustos de predicción térmica. Además, el desarrollo de un modelo térmico permite un ahorro económico en compra de software de terceros y abre la puerta para tener un software hecho específicamente para los requerimientos de la Universidad. También, puede ser empleado a nivel educativo por los estudiantes del campus.

Tomando en cuenta que la modelación es una parte importante de la aplicación de la Física, dado que se basa en el modelaje de fenómenos físicos para su estudio e interpretación, lo que conlleva a que en la práctica sea muy útil, a partir del estudio de vigas, el movimiento de astros, los efectos del cambio climático y la conducción de calor. Además, hoy en día, existe un mayor poder computacional, que permite el modelaje y predicción de una gran cantidad de fenómenos, los cuales requieren una capacidad computacional bastante alta. Inclusive, hoy en día, se genera un gran volumen de información, por lo que es más sencillo validar la información o precisión de modelos.

Asimismo, modelar el comportamiento térmico de satélites es importante, debido a que permite la toma de decisiones estructurales y la selección de componentes electrónicos y estructurales (e.g. elegir componentes que tengan un rango operativo dentro de las temperaturas a experimentar), dado que posibilita conocer las temperaturas máximas y mínimas, al igual que tiempo en el que se experimentarán condiciones extremas. A pesar de esto, el modelaje de los estados espaciales es muchas veces complicado, por lo que estos modelos tienen cierto alcance en la precisión de sus predicciones. A pesar de ello, un buen modelo puede dar una idea o una aproximación de lo mencionado.

La Física es una rama de la ciencia que se dedica a comprender y descubrir las leyes más fundamentales de la naturaleza. Es por dichas características, que se puede aplicar en distintas disciplinas del saber humano, esto viene dado por las herramientas matemáticas que se aprenden a lo largo del estudio de la Física, la capacidad de aprender a resolver problemas y la abstracción que necesitan. Actualmente, la física tiene más posibilidades de aplicarse en Guatemala, principalmente, en la reciente creación de un laboratorio de ingeniería aeroespacial y el lanzamiento del primer satélite guatemalteco, el Quetzal-1.

El Quetzal-1 es un proyecto por parte de la UVG (Universidad del Valle de Guatemala), que comenzó en 2014, donde se dieron los primeros pasos creando el primer diseño de un satélite y se realizó un estudio para definir la misión que éste tendría (Zea et al., 2016). Fue hasta el 11 de septiembre de 2014, que el Quetzal-1 fue seleccionado por UNOOSA y JAXA como ganador de la segunda ronda de la competencia KiboCUBE. El 6 de marzo del 2020 fue lanzada la cápsula Dragón, la cual llevaba al Quetzal-1 y por fin, el 28 de abril de 2020, a las 9:20 horas el Quetzal-1 fue lanzado desde el módulo Kibo de la ISS. Pasados 40 minutos de su lanzamiento, una estación en Oregon, Estados Unidos, recibe la primera señal del Quetzal-1, confirmando que se encontraba en órbita.

El Quetzal-1 es un CubeSat, tipo 1U, pesando aproximadamente 1kg de $10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$. La característica de estos CubeSat es la facilidad y bajo costo en la manufacturación de satélites y, actualmente, uno de sus fines principales es que sean utilizados en la educación. Es por esto, que el Quetzal-1 es una demostración de tecnología que busca formar capacidades locales para la creación de proyectos aeroespaciales; teniendo como finalidad ulterior, la prueba de un sensor óptico monocromático para el sensoramiento remoto de cuerpos de agua.

En este contexto es que se propone el tema de la presente tesis. El problema que se pretende resolver consiste en encontrar un modelo de temperatura contraposición del satélite. La idea es simular la trayectoria y las perturbaciones del Quetzal-1, junto con las condiciones ambientales y sus cambios a lo largo de la órbita, las cuales puedan ser consideradas como fuentes de calor. La importancia de esta investigación es que propone un modelo que puede ayudar a mejorar el cálculo del tiempo de vida para el Quetzal-1, así como, la selección de componentes electrónicos, al mismo tiempo, que es un precedente para futuras misiones que busquen lanzar satélites.

2.1. Objetivo general

Proponer un modelo que vincule la temperatura con la posición del Quetzal-1, a partir de los datos de los primeros meses enviados por este.

2.2. Objetivos específicos

- Obtener un modelo para la aproximación a corto plazo de la temperatura en función de la posición del Quetzal-1.
- Caracterizar el modelo propuesto comparándolo con los datos obtenidos en órbita.

2.3. Resultados esperados

- Un modelo de posición contra temperatura que se apegue a los datos actuales y futuros de la temperatura del Quetzal-1.

Justificación

En Guatemala hay mucho talento en muchas disciplinas, un ejemplo de esto es todo el trabajo, aprendizaje, recursos y posterior lanzamiento que supuso el Quetzal-1. Lo que fue y sigue siendo un trabajo monumental para Guatemala, especialmente, por la carencia de inversión en el tema de la ciencia e investigación, pero que significa una muestra del potencial que, como país, tenemos. En el Quetzal-1 han trabajado distintas generaciones de estudiantes aportando siempre conocimiento. Es por esto, que la intención de esta tesis es aportar a la nueva carrera aeroespacial guatemalteca, desarrollando un modelo que permita predecir la temperatura del Quetzal-1, a partir de su posición.

Esto es importante debido a que la temperatura no se ha comportado como se esperaba en el modelo que se utilizó para calcular las temperaturas a las que en teoría el satélite se iba a enfrentar. El alcance que tiene el modelo a largo plazo es que podría utilizarse en futuros proyectos o bien, como un punto de partida para que nuevas generaciones lo mejoren. Además, facilita la fase de diseño dando información sobre las temperaturas a las que el satélite estará expuesto en órbita.

4.1. Transmisión de calor

Para entender el mecanismo que permite la transmisión de calor entre cuerpos lo primero es remontarse a la primera ley de la termodinámica, la cual expresa que en un sistema la **energía** no se crea ni se destruye. El único medio por el que la **energía** de un sistema puede variar es por medio de interacciones con su entorno, que se manifiestan en forma de trabajo y calor. De esta forma, la primera ley se puede enunciar como:

$$Q = Wk + \frac{\partial U}{\partial t} \quad (1)$$

Donde Q es la cantidad de calor que entra al sistema por unidad de tiempo, Wk es la cantidad de trabajo que se hace por unidad de tiempo y $\frac{\partial U}{\partial t}$ es el cambio de la **energía** interna del sistema. Todas estas cantidades pueden medirse en **Watts**, o bien, **julios** por segundo (J/s). Sin embargo, cuando Q es positivo se tiene un flujo entrante de calor, cuando Wk es positivo se debe a que el entorno está haciendo trabajo sobre el sistema y cuando $\frac{\partial U}{\partial t}$ es positivo indica que la **energía** interna del sistema está aumentando. (Lienhard y Lienhard, 2020).

Ahora bien, para sistemas reales se toma en cuenta que el trabajo depende del cambio del volumen en el tiempo, por lo tanto, según Lienhard y Lienhard, 2020 se puede definir la ecuación de calor como:

$$Q = p \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2)$$

Donde p representa la presión, V el volumen, U la **energía** interna y Q el calor.

De la ecuación 2, se pueden definir 2 procesos propuestos por Lienhard y Lienhard, 2020 que se muestran a continuación:

$$Q = \frac{\partial U}{\partial t} = mc_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

$$Q = \frac{\partial H}{\partial t} = mc_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Donde c_p y c_v son los calores específicos a presión y volumen constantes y H es la entalpía. Si se asume que el sistema es incompresible, lo que implica que el volumen no varía en función de la

presión (como podría ser un satélite en una órbita LEO (Low Earth Orbit), que en su superficie está compuesta por materiales incompresibles), entonces se asume que los calores específicos son los mismos $c_p = c_v = c$, por lo que, (Lienhard y Lienhard, 2020), se puede concluir que:

$$Q = mc \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

4.1.1. Formas de transmisión de calor

Se sabe que cuando dos sistemas se encuentran a distintas temperaturas existe un flujo de calor del más caliente al más frío, un ejemplo de esto es un satélite que libera calor hacia el ambiente (el espacio) que se encuentra mucho más frío. En la naturaleza existen tres mecanismos mediante los cuales se puede dar transferencia de calor, que son:

Conducción:

Hace referencia al flujo de calor a través de algún medio entre dos sistemas. Un ejemplo moderno de este sistema es la refrigeración líquida que se implementa para el enfriamiento de procesadores. Esta forma de transmisión de calor fue desarrollada por Joseph Fourier en la denominada Ley de Fourier. Donde algo importante a remarcar es que se trabajará con el flujo de calor por unidad de área que se denominará como \vec{q} ($\frac{W}{m^2}$) (Lienhard y Lienhard, 2020).

Empíricamente se puede entender a la ecuación como: el flujo de calor resultante de la conducción es proporcional a la magnitud del gradiente de temperatura y opuesto en signo

$$\vec{q} = -k\nabla T = -k \frac{dT}{dx} \hat{i} - k \frac{dT}{dy} \hat{j} - k \frac{dT}{dz} \hat{k} \quad (6)$$

Donde: x, y y z son las coordenadas cartesianas definidas sobre el cuerpo y k es llamada conductividad térmica y depende de la posición y temperatura en los casos más generales, en este caso se toma que el material es isotrópico, por lo tanto, se descarta la dependencia de la posición. (H. S. Carslaw, 1959)

Además, la ecuación 6 no es, específicamente, la ecuación 5, sin embargo, el desarrollo para llevar a la ecuación 6 a la ecuación 5 es conocida y se puede encontrar el desarrollo en (H. S. Carslaw, 1959). Por lo tanto, dado los fines de este trabajo se presenta solamente la solución que es llamada ecuación de calor y se define como:

$$\alpha \nabla^2 T = \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

Donde α es la difusividad térmica y está definida como:

$$\alpha = \frac{k}{c\rho} \quad (8)$$

Donde c es el calor específico y ρ es la densidad del material. Por lo tanto, multiplicando por el volumen a la ecuación 7 y reordenando se recupera la estructura de la ecuación 5

$$Q = mc \frac{dT}{dt} = k \nabla^2 T \quad (9)$$

Radiación:

Todos los cuerpos pierden **energía** por medio de radiación **electromagnética**. La emisión de radiación depende de dos factores: las características de la **superficie** del material y la **temperatura** a la que esté, (de la Peña, **1996**).

El intercambio de **energía** se debe a que las ondas **electromagnéticas** irradiadas por los cuerpos transportan cierta **energía** que depende de su **longitud de onda**, λ , y su **Frecuencia**, ν , y esta puede ser caracterizada por el vector de Poyting, (Griffiths, **2017**).

Para encontrar el flujo de radiación de un cuerpo negro (ecuación **12**) se seguirán el procedimiento y simplificaciones propuestas por (Lienhard y Lienhard, **2020**). Por lo tanto:

Primero se asumirá que el cuerpo negro emite radiación con una misma **longitud de onda**, lo que se llama poder emisor monocromático y se denomina como $P_\lambda(\lambda, T)$. Otra simplificación será que el cuerpo se comporta como un cuerpo negro, esto implica que absorbe todas las frecuencias de las ondas **electromagnéticas**, por lo tanto, el calor total por unidad de área de todas las longitudes de **onda** que el material emite puede caracterizarse como:

$$P(T) = \int_0^\infty e_\lambda(\lambda, T) d\lambda \quad (10)$$

Ahora bien, la dependencia de la **temperatura** para $P(T)$ fue establecida por Josef Stefan en 1879 y explicada por Ludwig Boltzmann en 1884. El resultado es la ley de **Stefan-Boltzmann**:

$$P = \sigma T^4 \quad (11)$$

Donde $\sigma = 5.670374 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$. Algo importante a destacar es que se asumió que es un cuerpo negro, sin embargo, en la realidad los materiales utilizados no se comportan como tal, sino, estos solamente irradian cierta fracción, que puede ser caracterizada por la constante llamada **emisividad**, ϵ , la cual es una constante adimensional. Con eso, multiplicando por el área y tomando en cuenta que, cuando un cuerpo radia, lo que se está haciendo es perder calor:

$$mc \frac{dT}{dt} = -A\sigma\epsilon T^4 \quad (12)$$

Mediante el estudio de los cuerpos y su radiación, se pueden definir tres constantes más: la **absorbancia** α , **reflectancia** ρ , y la **transmitancia** τ . Que se relacionan de la siguiente forma:

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (13)$$

La **absorbancia** es la fracción de radiación absorbida por el cuerpo, la **reflectancia** la fracción de radiación reflejada y la **transmitancia** la cantidad de radiación que pasa a través del cuerpo. En un cuerpo negro $\alpha=1$ por lo tanto $\tau = \rho = 0$.

4.1.2. Modelo implementado

A partir de lo desarrollado anteriormente, y tomando como referencia la ecuación definida por (Paluszek et al., **s.f.**), se define la siguiente ecuación para un modelo **isotérmico**:

$$mc \frac{dT}{dt} = k\nabla^2 T + Q(t) - A\sigma\epsilon T^4 \quad (14)$$

Donde el primer término del lado izquierdo es la ecuación [5], del lado derecho de la ecuación se tiene como primer término a la fuente de calor por medio de conducción (ecuación [9]), el término $Q(t)$ son todas las fuentes de calor ambientales, las cuales son todas las fuentes de calor presentes en una órbita LEO (ecuaciones [30], [31] y [32]) y, por último, se tiene la ley de Stephan-Boltzmann (ecuación [12]).

4.2. Mecánica orbital

4.2.1. Marcos de referencia

Un marco de referencia es un sistema de tres coordenadas mutuamente perpendiculares, que sirven como sistema de referencia para describir la evolución en el tiempo de un sistema. Tienen la propiedad de describir al sistema mediante distintas geometrías o respecto a distintos puntos de referencia. Un ejemplo sencillo de sistemas con distintas geometrías son las coordenadas cartesianas y coordenadas esféricas. Donde las coordenadas cartesianas son especificadas por tres coordenadas x , y y z . Mientras que para coordenadas esféricas se tienen: el radio r , el ángulo polar θ y el ángulo azimutal ϕ .

Earth Centered Inertial Frame

El sistema Earth Centered Inertial Frame (ECI) es un marco de referencia usado para órbitas terrestres cercanas. El origen del sistema está en el centro de gravedad de la tierra. El eje x apunta hacia el equinoccio vernal, el eje z hacia el polo norte celeste. El eje y es simplemente el producto cruz entre el eje x y z . (Grewal et al., [2007])

Earth Centered fixed frame

El sistema Earth Centered fixed frame (ECEF) tiene el mismo origen y coordenada z , que el sistema ECI, pero este rota con la tierra. Como consecuencia las longitudes de ECI y ECEF varían como una función lineal del tiempo. (Grewal et al., [2007])

Local Vertical Local Horizontal

El sistema de referencia Local Vertical Local Horizontal (LVLH) se encuentra definido tal que el eje z , apunta siempre hacia el centro de la Tierra, el eje y apunta hacia la normal negativa del plano orbital y el eje x es el vector perpendicular entre estos 2. (Bloise et al., [2017])

QMAG

Es el sistema de referencia en el que el eje z se encuentra apuntando hacia la dirección del campo magnético, mientras que el plano x - y se encuentra perpendicular a z . Cabe destacar, que este sistema se empleó, específicamente, para los fines de esta tesis. (Alvarez Ruano, [2019])

Body Frame

En este sistema el origen y los respectivos ejes cartesianos son definidos dentro del cuerpo del satélite. Este sistema se utiliza en el momento del ensamblaje de los satélites y, también, se utiliza por el sistema de control de actitud para conocer la orientación del satélite. (Markley y Crassidis, 2014)

Bodyframe es el sistema empleado para el Quetzal 1 y se encuentra en el centro geométrico del satélite, donde el eje z apunta hacia la antena de este y los ejes x , y son perpendiculares entre ellos y al eje z (Alvarez Ruano, 2019). La orientación de los ejes se muestra en la siguiente figura:

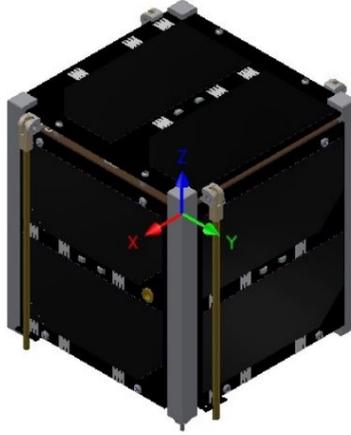


Figura 1: Sistema bodyframe para el Quetzal 1. Alvarez Ruano (2019)

4.2.2. Cuaterniones

El desarrollo de los cuaterniones se atribuye a W. R. Hamilton en 1843. La principal ventaja por la que son usados para representar rotaciones en tres dimensiones es que las matrices de rotaciones son de tamaño 3×3 , por lo que emplean 9 componentes para el cálculo de la rotación de un vector, mientras que un cuaternión solamente emplea cuatro componentes, lo que significa que la eficiencia de este método radica en que se necesita utilizar menos cálculos, al igual que se requiere menos información para calcular la rotación. (Kuipers, 2020)

Ahora bien, un cuaternión se define como la suma de un escalar q_0 , con un vector $\vec{q} = (q_1, q_2, q_3)$ (Kuipers, 2020), por lo tanto, un cuaternión se puede escribir como:

$$q = q_0 + \vec{q} = q_0 + q_1 \hat{i} + q_2 \hat{j} + q_3 \hat{k} \quad (15)$$

Que cumple con las siguientes propiedades:

$$\hat{i}^2 = \hat{j}^2 = \hat{k}^2 \quad (16)$$

$$\hat{i}\hat{j} = \hat{k} = -\hat{j}\hat{i} \quad (17)$$

$$\hat{k}\hat{i} = \hat{j} = -\hat{i}\hat{k} \quad (18)$$

Si a partir de los cuaterniones se define el siguiente operador, (Kuipers, 2020) propone, entonces:

$$R_q(\vec{v}) = qvq^* \quad (19)$$

En el que q^* es la transpuesta del cuaternión. Entonces, resulta que según Kuipers (2020), este operador posee dos propiedades principales: el vector $R_q(\vec{v})$ no cambia de **magnitud**, con respecto, a la **magnitud** de \vec{v} y si el vector \vec{v} apunta hacia la dirección del vector \vec{q} este permanece sin cambios. Esto, da dos pistas sobre el operador $R_q(\vec{v})$, dado que preserva la norma de los vectores y no afecta a los vectores que apuntan a la dirección \vec{q} , lo que son dos propiedades de las rotaciones: no cambia la norma del vector y los vectores que apuntan hacia el eje de **rotación** no se ven afectados.

Según Kuipers (2020), estas dos propiedades son importantes para la demostración del siguiente **teorema**, que justifica el uso cuaterniones para la **rotación** de vectores y sistemas de referencia, sin embargo, acá no se presentará la demostración:

Teorema: para todo cuaternión unitario:

$$q = q_0 + \vec{q} = \cos \frac{\theta}{2} + \hat{u} \sin \frac{\theta}{2} \quad (20)$$

Y para cualquier vector \vec{v} el operador:

$$R_q(\vec{v}) = qvq^* \quad (21)$$

Es equivalente a una **rotación** del vector un ángulo θ alrededor de los ejes de **rotación**.

4.2.3. Problema restringido de dos cuerpos

Uno de los desarrollos más importantes en la historia de la humanidad fue la solución analítica del problema de 2 cuerpos, por Isaac Newton, fascinado por la precisión de las leyes de Kepler. Aplicando toda la teoría que había desarrollado sobre las leyes de movimiento de los cuerpos, llegando a la ley Universal de Gravitación (Pisacane, 2005):

$$F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \hat{r} \quad (22)$$

Donde, F_g es la fuerza ejercida por la **gravedad**, r es la distancia entre los 2 cuerpos, m_1 y m_2 es la **masa** de los 2 cuerpos y G es la constante gravitacional ($\approx 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$). Las leyes de Newton y Kepler son las bases del entendimiento de las **órbitas** y la astrodinámica, (Pisacane, 2005).

Elementos orbitales clásicos

Aplicando un entendimiento básico de las Leyes del Movimiento, la ley universal de gravitación y las leyes de Kepler, es posible predecir las trayectorias orbitales de **satélites**, dada la posición en un tiempo determinado, la dirección y **magnitud** de la velocidad y el parámetro gravitacional μ mencionados en algún marco de referencia. Sin embargo, este modelo es demasiado sencillo como para ser preciso a lo largo del tiempo.

Además, se debe tomar en cuenta que la forma de la Tierra no es uniforme, al igual que su distribución de **masa**, las fuerzas gravitacionales ejercidas por la Luna y el Sol, así como, la presión de radiación solar. Y, además, ninguna de estas fuerzas es constante en el tiempo. Mientras que el modelo clásico para el problema de dos cuerpos da una solución en la que la **órbita** se mantendrá sobre un mismo plano; en la realidad, el movimiento será completamente en tres **dimensiones**. Entonces, una buena forma para ubicar y describir el tamaño, forma y **orientación** de las **órbitas** es utilizar los elementos orbitales clásicos, (Johnson, 2017).

Semieje mayor a En una **órbita** elíptica el semieje mayor es referido a la mitad de la distancia del eje mayor de la elipse. Para medir esto solo es necesario medir el perigeo R_p y apogeo R_a , tomando en cuenta que el centro de la tierra se encuentra en el foco de la elipse. (Paluszek et al., 2012)

Según Paluszek et al. (2012), se define como:

$$a = \frac{R_p + R_a}{2} \quad (23)$$

Si la **órbita** es circular, entonces tenemos que:

$$a = \frac{R + R}{2} = R \quad (24)$$

Excentricidad ϵ Es una medida que determina la forma de la **órbita**. Matemáticamente se puede tomar como el grado de desviación de una sección cónica respecto a una circunferencia. (Johnson, 2017)

Y está dada por:

$$\epsilon = \frac{R_a - R_p}{R_a + R_b} \quad (25)$$

Inclinación (i) Esta inclinación es medida entre el plano de la trayectoria del **satélite** y el plano ecuatorial. Esto es importante debido a la forma de la Tierra, ya que los efectos gravitacionales variarán en función de su inclinación. Las **órbitas** se pueden clasificar como: ecuatoriales ($i = 0^\circ$), polar ($i = 90^\circ$), progrado ($0^\circ \leq i \leq 90^\circ$) y retrógrado ($90^\circ \leq i \leq 180^\circ$) (Johnson, 2017)

Asunción derecha del nodo Ω Este parámetro mide respecto al equinoccio Vernal, el punto en el que la trayectoria del **satélite** se intercepta con el plano ecuatorial y cruza del hemisferio sur al norte. Puede variar entre ($0^\circ \leq \Omega \leq 360^\circ$) (Johnson, 2017)

Argumento del perigeo ω El Argumento del perigeo mide desde la asunción derecha del nodo hasta el perigeo de la trayectoria. Puede variar entre ($0^\circ \leq \omega \leq 360^\circ$) y se mide sobre el plano ecuatorial. (Johnson, 2017)

Anomalía verdadera ν Es medido del perigeo de la **órbita** hasta donde se encontraba en el momento de la medición. Es medido sobre el plano de la trayectoria del **satélite** y va entre ($0^\circ \leq \nu \leq 360^\circ$) (Johnson, 2017)

4.2.4. Ángulo beta

Según Sumanth (2019), el ángulo beta se puede definir como el ángulo entre el vector solar y su proyección sobre el plano orbital. Una forma de calcular este ángulo es calcular el ángulo entre el vector solar \hat{s} y el vector normal al plano orbital \hat{n} , donde la relación viene dada por:

$$\Phi = \frac{\pi}{2} + \beta \quad (26)$$

Además el ángulo beta no es constante en el tiempo, este cambia a lo largo del tiempo, debido a las perturbaciones orbitales, la variación de la declinación solar (ángulo entre el ecuador y el plano que intercepta a la Tierra y al Sol) y la ascensión derecha del solar (es equivalente a la longitud entre la Tierra y el Sol). (Sumanth, 2019).

La importancia del ángulo beta es que, a partir de este, es posible conocer cuando habrá tiempos más largos de sombra o tiempos más largos de luz. Por ejemplo, para 0° se tiene el eclipse más largo, dado que la tierra se encontrará siempre entre el satélite y el Sol, mientras que para los 90° no existe eclipse y, por lo tanto, el satélite se encontrará recibiendo luz solar constantemente. (Sumanth, 2019).

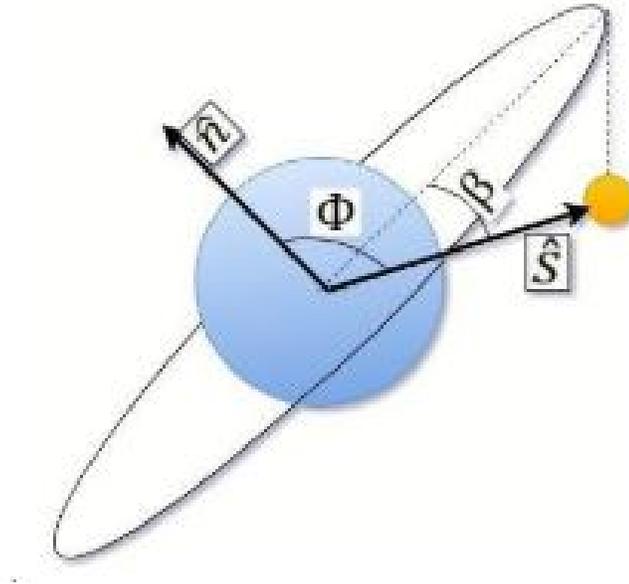


Figura 2: Representación del ángulo beta.
Sumanth (2019)

4.2.5. Perturbaciones orbitales

En la realidad, el problema restringido de los dos cuerpos no es suficiente para hacer predicciones reales del movimiento de los mismos. En el sistema solar existen distintas fuentes de perturbaciones que modifican constantemente la trayectoria de los satélites en órbita (Johnson, 2017). A continuación, se presentan los más relevantes para el presente trabajo:

Variaciones gravitacionales causadas por la forma de la Tierra Se sabe que la Tierra es 11 km más ancha en el ecuador que en los polos, al igual que la **masa** en la tierra no está distribuida uniformemente. Estas variaciones entre **masa** y forma obligan a modelar a la tierra como un conjunto de distintos componentes independientes, los cuales se les asocia un geo-potencial determinado. Una de las fuerzas que tienen mayor **magnitud** es el empuje del Ecuador hacia el **satélite** y que es conocido como el coeficiente J2. (Johnson, 2017).

Efectos de los tres cuerpos Como se había hablado anteriormente, tanto la Luna y el Sol generan un conjunto de efectos periódicos y seculares sobre el **satélite** (Johnson, 2017).

Presión de radiación solar La presión de radiación solar es una **aceleración** pequeña, sin embargo, es constante, por lo que siempre afectará de manera significativa al **satélite** conforme pase intervalos grandes de tiempo. (Johnson, 2017).

Según Johnson (2017), la presión de radiación solar está descrita por la siguiente ecuación:

$$a_r \approx -4.5 \cdot 10^{-6}(1+r)A/m \quad (27)$$

Donde r es el **factor de reflexión**. A es el área de la **superficie** expuesta al Sol y m la **masa** del **satélite**.

Arrastre atmosférico El **arrastre atmosférico** en **órbitas** bajas es la fuerza más complicada de modelar de forma precisa. (Johnson, 2017)

Según Johnson (2017), la **aceleración** producida por el **arrastre atmosférico** está dada por:

$$a_D = -(1/2)\rho(C_d A/m)V^2 \quad (28)$$

Donde ρ es la densidad atmosférica, C_d es el coeficiente de arrastre del **satélite**, m , A V son la **masa**, área y mismo. El problema principal es que tanto el área, el coeficiente de arrastre y la velocidad pueden variar mucho conforme este se mueve en su trayectoria orbital, (Johnson, 2017).

Propagadores de **órbita**

Un propagador de **órbita** es en pocas palabras un algoritmo que utiliza ciertas aproximaciones a los modelos que explican las perturbaciones orbitales para generar la posición y la velocidad de un **satélite** en **órbita** utilizando un cierto sets de elementos. Se puede pensar que los propagadores de **órbita** representan soluciones a ecuaciones de movimiento de uno o varios cuerpos. Esto, debido a que solamente se pueden tener soluciones exactas para el problema de 2 cuerpos, en el mundo real se deben aplicar simplificaciones o resolver de cierta forma las ecuaciones, lo que lleva a la siguiente clasificación de propagadores de **órbita**: solución aproximada (analíticos), métodos (numéricos), o una combinación de ambas para las soluciones (semi-analíticas), (Johnson, 2017).

Según Analytical Graphics (s.f.), los propagadores de **órbita** analíticos más comunes son:

1. Two body

2. J2
3. J4
4. SGP4 para **órbitas** LEO
5. 11 Parameters
6. GPS

Según Analytical Graphics (s.f.), los propagadores semianalíticos más comunes son:

1. LOP
2. SGP4 para órbitas no LEO

Por último, según Analytical Graphics (s.f.), los propagadores numéricos más comunes son:

1. Astrogator
2. HPOP

Simplified General Perturbations

Los modelos de perturbaciones simplificados son un set de 8 modelos (SGP.SGP4. SDP4 Y SDP8) utilizados para calcular el estado y posición de un **satélite** con respecto al marco de referencia ECI. Sin embargo, usualmente se mencionan todos estos como SGP4, debido a que es el que se utiliza con más **frecuencia**. El SGP4 y el otro conjunto de modelos predicen el efecto de las perturbaciones por la forma de la tierra, el arrastre, la radiación y el efecto de la **gravedad** en otros cuerpos como la luna y el Sol, (Mahooti, 2020).

En general es una familia de modelos que aproximan el movimiento de **satélites** los cuales tienen **órbitas** inferiores a 255 minutos, (Johnson, 2017).

4.3. Satélites en **órbitas** bajas

4.3.1. Características

Una **órbita** terrestre baja o LEO por sus siglas en inglés "Low earth orbit" es, generalmente, definido para **órbitas** con una altura menor a los 2000 kms. Los periodos orbitales varían entre 90 y 120 minutos. Dado que la velocidad orbital, y, por lo tanto, el periodo, también, depende de la altura. Los objetos en **órbitas** LEO tienden a tener velocidades muy altas, sobrepasando los 25,000 km/h. Esto hace que localmente, el **satélite** solo se pueda ver cerca de 20 minutos, por lo que se aprovecha ese tiempo para la transferencia de datos a las estaciones de Tierra, (Gilmore, 2002).

Las **órbitas** LEO pueden tener inclinaciones de entre $[0^\circ, 90^\circ]$ vs el plano ecuatorial, esto conduce a que se generen diferencias en el tiempo de luz y sombra. Por ejemplo, a una altura de 650 km se tiene un tiempo máximo de 35 en sombra, sin embargo, si se elige una **órbita** polar que son 90° de inclinación, entonces, el **satélite** estará casi todo el tiempo recibiendo luz solar, (Gilmore, 2002).

4.3.2. Fuentes de calor

Para **órbitas** terrestres bajas se tiene que la altitud del **satélite** es pequeña respecto al radio de la tierra, por lo que el mismo, solo observa una pequeña porción de la tierra, esto implica que este mismo, sea sensible a los cambios en las condiciones ambientales de cada región por la que pasa. Esto, viene dado por distintas combinaciones de la presencia de nubes, mares, nieve, etc. En este caso, todas estas condiciones se pueden resumir en 2 fuentes de calor principales: la radiación terrestre, que es el calor que desprende la tierra y el **albedo**, el cual es la **energía** reflejada del sol hacia el espacio, (Gilmore, 2002).

Por otro lado, la principal fuente de calor en el espacio es toda la radiación emitida por las estrellas y planetas. Sin embargo, todas estas fuentes se toman como despreciables, excepto la solar. La cual es una fuente estable de **energía** e inclusive es mucho mayor a la producida por la radiación terrestre y el **albedo**, (Gilmore, 2002).

Radiación solar

El Sol es la principal fuente de calor en el ambiente para una **satélite** en **órbitas** bajas. La principal ventaja es que el Sol es una fuente estable de **energía**. Ahora bien, debido a la **órbita** elíptica de la Tierra la intensidad del sol sobre esta cambia un $\pm 3.4\%$ durante el año, dependiendo de la distancia de la tierra con el Sol (Gilmore, 2002). Además, según (Elhady, 2010), el flujo solar se puede caracterizar como:

$$q_{solar} = \alpha S \cos(\theta) \quad (29)$$

Donde α es la **absorbancia** de la **superficie**, S la constante solar ($1367 \frac{W}{m^2}$) y el ángulo incidente θ entre el vector normal de la cara del **satélite** y el vector solar.

Además, se puede agregar un término extra "n" que represente el flujo de luz solar debido a la sombra que pueda generar la Tierra sobre el **satélite**. Por lo tanto, cuando este se encuentre entre el Sol y la Tierra $n = 1$, y cuando la Tierra genera un eclipse sobre este, tendremos $n = 0$, por lo tanto:

$$q_{solar} = \alpha S \cos(\theta) n(t) \quad (30)$$

Albedo

El **albedo** es toda la luz del Sol y la Luna que se refleja de vuelta. El **albedo** de los planetas es expresado como la fracción entre la luz incidente y la reflejada al espacio y esta es altamente variable. La reflectividad es más grande sobre regiones continentales que las regiones oceánicas, además, que este se ve afectado, debido a la presencia de nubes (Gilmore, 2002). Basándose en el proceso de (Garzón y Villanueva, 2018) se tiene que la ecuación que describe el flujo proveniente del **albedo** se puede caracterizar como:

$$q_{albedo} = \alpha S A_f \cos(\theta) \quad (31)$$

Donde la radiación del **albedo** sobre el objeto esta dada por la absorción solar α , la **reflectancia** de la porción de Tierra que irradia al objeto A_f , la constante Solar S , el ángulo incidente θ entre

el vector normal de la cara del **satélite** y el vector del **albedo** y la variable $n(t)$ que representa las épocas de luz y sombra.

Emisión infrarroja terrestre

Toda la luz del sol, que no es reflejada como **albedo**, es absorbida por la Tierra y eventualmente, emitida como **energía** IR (infra roja). Este valor se mantiene, aproximadamente, constante, si se toma el promedio global. Sin embargo, la radiación IR pueden variar localmente, debido a un conjunto de factores como la **temperatura** local, las nubes, etc. (Gilmore, 2002). La ecuación que describe el flujo del IR terrestre basándose en el resultado de Lienhard y Lienhard, 2020, es:

$$q_{IR} = \sigma \epsilon \cos(\theta) T_E \quad (32)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, ϵ es la **emisividad** de la **superficie** terrestre, el ángulo incidente θ entre el vector normal de la cara del **satélite** y el vector terrestre y T_E es la **temperatura** de la Tierra.

4.4. CubeSat Toolbox

4.4.1. Princeton Satellite System's CubeSat Toolbox

SunVI

La función calcula la distancia del **satélite** hasta el sol y sus vectores unitarios en el sistema ECI. Esto, permite conocer la dirección respecto al **satélite** del Sol y, por lo tanto, qué caras son irradiadas. Sus entradas son:

- jD: Fecha juliana
- rSc: Vector de posición del satélite en sistema de referencia ECI

y sus salidas son:

- u: vector unitario solar
- r: distancia del origen al Sol (km)

Según la descripción que ofrece el paquete de la función: SunVI calcula el vector unitario y la distancia entre el **satélite** y el Sol.

Eclipse

Esta función calcula en qué tiempos un **satélite** se encontrará en eclipse. Para el caso del presente trabajo de graduación, se empleó para conocer los tiempos en que la Tierra ocultó al Sol, respecto a la posición del **satélite**. Sus entradas son:

- rSc: Vector de posición del satélite en el sistema ECI.

- RSource: vector de posición de la fuente de luz.
- radiusPlanet: Radio del planeta que causa el eclipse (por default se asume el de la Tierra)
- radiusSource: Radio de la fuente de luz (por default se asume el Sol)

Sus salidas son:

- n: Intensidad normalizada de la fuente
- eclipseType: el tipo de eclipse. 0 sin eclipse, 1 parcial, 2 anular y 3 total.

RHSIsothermalCubeSat

Esta función emplea la ecuación que rige el flujo térmico del fenómeno a estudiar para encontrar la derivada de la **temperatura** respecto al tiempo. Esta derivada se puede emplear para resolver la ecuación mediante métodos numéricos. Cabe destacar, que se calculó la **temperatura** mediante la derivada, que esta función devuelve empleando Runge-Kutta de grado 4.

Sus entradas son:

- T0: **temperatura** inicial
- d: estructura de datos:
 - d.mass: **masa** total
 - d.uSurface: vectores unitarios de las superficies.
 - d.alpha: Absorvancia.
 - d.epsilon: **emisividad**
 - d.area: area de las caras del satélite
 - + d.cP: **calor específico**
 - d.powerTotal: poder interno
- p : **flujo térmico** en el sistema body frame

Y sus salidas son:

- tDot: Derivada de la **temperatura**
- Teq: **Temperatura** de equilibrio

Existen muchos artículos científicos que hablan sobre simulaciones térmicas para un CubeSat de las características del Quetzal-1. Sin embargo, dado el alcance del trabajo de graduación estos trabajos superan al análisis que se quiere realizar. Este es un tema complicado a nivel guatemalteco, dado que no hay referencias o antecedentes de este tipo de trabajos.

El Quetzal-1 es el único antecedente a nivel guatemalteco, por lo que, para fines del presente trabajo, las características importantes de este CubeSat que se tomaron en cuenta para las simulaciones es que posee un sistema de control de actitud pasivo, el cual consiste en un imán que se alinea con el **campo magnético** de la Tierra. También, se utilizó la información de los sensores de **temperatura**, que se encontraban en la placa del sistema de control de actitud, los cuales son: el sensor BNO, que se encuentra abordo de la Unidad de Medición Inercial, y el BNO055 ubicado en la esquina -x, -y de la placa electrónica del Sistema de control.

Sin embargo, a nivel Latinoamericano, se tiene que Garzón y Villanueva (2018), fue de especial utilidad para el desarrollo del proyecto. Este artículo es una guía para una simulación térmica, en este caso, trabajan con un modelo isotérmico, pero que toma en cuenta distintas formas de absorción de calor y su emisión. La principal diferencia con el modelo que se presenta en la tesis es que este toma en cuenta las interacciones con las distintas caras (flujo de calor por conducción).

Por otro lado, está el modelo propuesto por Khaniki y Hossein Karimian (2014). Aunque este es un modelo mucho más robusto, es un modelo que sigue tomando solamente una capa de material a la hora de la simulación térmica, por otro lado, se refiere a los sensores y a cómo la pérdida de precisión afecta a la medición, además de formas para corregir dicha pérdida de información. Por lo que sentó un precedente a la hora de estudiar y entender el comportamiento térmico del Quetzal-1.

6.1. Definición de la misión

Se define el tipo de **órbita** que tendrá el **satélite**, dado que, dependiendo del tipo de misión, el **satélite** tendrá distintos tiempos de luz y sombra, épocas con ángulo beta alto o no y cambiará el efecto de algunas fuentes de calor sobre el **satélite** como puede ser el Albedo.

El responsable de simulaciones correctas según la misión es el propagador de **órbitas**, en el caso del presente trabajo de graduación se trabajó con el "**SGP4**", que según Mahooti (2020), tiene las ventajas de estar creado para objetos con periodos orbitales menores a (3.15 horas); basados en esto, y que la información recopilada del **satélite** indica que sus periodos son menores a este tiempo, haciendo aproximadamente 56 periodos por día (0.4287 horas), se consideró como un propagador idóneo para las simulaciones de posiciones y velocidades.

Dinámica del **satélite**:

Las caras que son irradiadas por el Sol o el **albedo** no solo dependen de la **órbita** y velocidad del **satélite**, sino, también del giro que este tiene y el sistema de referencia al que está alineado. El modelo contempla que el **satélite** gira para alinear el sistema bodyframe al sistema Qmag, pero, además, se optó por agregar un giro a velocidad constante en el sistema bodyframe, para simular las condiciones dinámicas reales a las que el Quetzal-1 se vio sometido. Para este caso, se empleó un promedio de las velocidades angulares en los tres **ejes cartesianos** del **satélite**, para el estudio de su comportamiento térmico. Las cuales son:

Eje	Velocidad angular en grados
x	-0.481
y	-2.074
z	10.703

Tabla 1: Velocidades angulares promedio del Quetzal-1

y se empleó el sistema QMAG para la alineación del sistema BodyFrame.

6.1.1. Fuentes de calor externas

Las fuentes de calor dependen del tipo de **órbita** elegida, en el caso del tipo de **órbita** del Quetzal-1 se tomó en consideración la radiación emitida por el Sol, el **albedo** y la Tierra.

Con respecto al Sol, se sabe que este es un valor aproximadamente constante, por lo que se asumió que el flujo solar es siempre el mismo y que es igual a la constante solar.

Ahora bien, para el **albedo**, se tiene que, al ser una misión LEO, el radio de la Tierra es mucho mayor a la altura del **satélite**, por lo que el flujo de calor, debido al **albedo** dependerá solamente de la **superficie** o zona en la que se encuentre el **satélite**, sin embargo, según (Gilmore, 2002), calcular el valor del **albedo** por temporadas es inviable, además que utilizar un valor de **albedo** promedio mensual, tampoco es viable, dado que no permite encontrar los puntos de seguridad o críticos para el diseño de **satélites**. A partir de esto, el mismo autor recomienda utilizar un promedio, dependiendo del periodo orbital y la inclinación del satélite. Sin embargo, a falta de datos actualizados y debido a que el **albedo** tiene una variación a lo largo del tiempo, se tomó como referencia los datos proporcionados por «Albedo data», **s.f.** que se muestran en la siguiente figura:

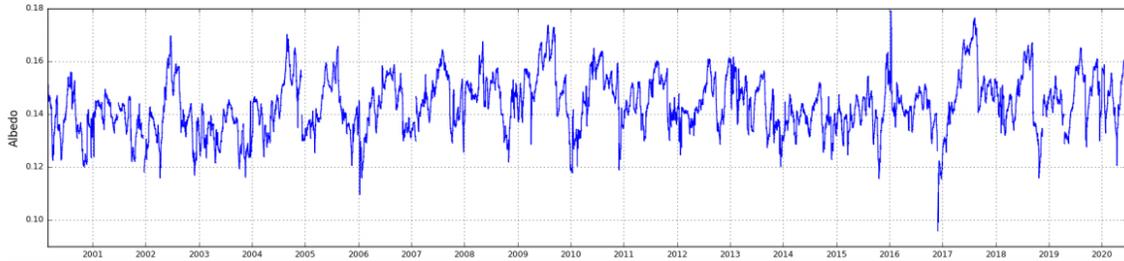


Figura 3: Variación anual del **albedo**
«Albedo data» **(s.f.)**

Se decidió corroborar los datos de Gilmore, 2002 con los de «Albedo data», **s.f.** a forma de encontrar o proponer un valor que pudiese servir como referencia para calcular el **albedo**. A partir de esto, se propuso que el valor fuera de aproximadamente 0.16. Con esto, las fuentes de calor externas se consideran:

$$Q(t) = q_{solar} + q_{albedo} = \alpha S \cos(\theta)n(t) + \alpha S \cos(\theta)n(t) * 0.16 \quad (33)$$

6.2. Modelo térmico

Dadas las limitaciones, y el enfoque del trabajo de graduación se trabajó con un modelo isotérmico, por lo que la **temperatura** de todas las caras y partes del **satélite** se verán caracterizadas por

una **temperatura** solamente. Dado esto, se modeló al **satélite** de tal forma, que no hay interacción entre las caras del mismo y no está caracterizado por capas, o distintos materiales y la única forma que este tiene para liberar calor es mediante radiación **electromagnética**, en este caso, caracterizado por la ecuación de Stephan-Boltzmann.

Sin embargo, para el estudio de los flujos externos, como el Sol y el **albedo**, se toma en cuenta que las caras están siendo irradiadas y, a partir de esto, se obtiene un flujo total, que es utilizado para la obtención de la **temperatura**.

Habiendo definido las características principales, la ecuación que se empleará para el modelo es:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = Q(t) - A\sigma\epsilon T^4 = \alpha S \cos(\theta)n(t) + \alpha S \cos(\theta)n(t) * 0.16 + c - A\sigma\epsilon T^4 \quad (34)$$

Donde c es el calor interno que el **satélite** genera.

Ahora bien, para la **masa** del **satélite** se utilizó como 1 kg; para el **calor específico**, **emisividad** y **absorbancia** del sistema se estudiaron dos casos específicos: asumiendo que el mismo está completamente formado por panel solar, dado que este es el material que más **superficie** ocupa en las caras externas del **satélite** y, asumiendo que todos estos valores son un promedio ponderado de los distintos materiales que conforman el CubeSat.

Por lo tanto tenemos dos casos:

Valores	Panel solar	Promedio ponderado
Cp	350.00	659.40
Absorvancia(α)	0.90	0.80
Emitancia(ϵ)	0.81	0.81

Tabla 2: Valores de las constantes para distintas propiedades ópticas

6.3. Estudio del modelo

Como primera parte, se estudió el modelo y cómo es que las diferencias en las condiciones ambientales, propiedades ópticas y sistemas de referencia lo afectaban. Por lo tanto, las variaciones que se estudiaron fueron:

Variable	Rango	Constantes							Sistema de referencia
		α	ϵ	Cp	Albedo	w_x	w_y	w_z	
α	[0,1]	—	0.81	350	0.16	-0.481	-2.074	10.703	Qmag
ϵ	[0,1]	0.9	—	350	0.16	-0.481	-2.074	10.703	Qmag
Cp	[50,1000]	0.9	0.81	—	0.16	-0.481	-2.074	10.703	Qmag
Albedo	[0,1]	0.9	0.81	350	—	-0.481	-2.074	10.703	Qmag
w_i	[-23,23]	0.9	0.81	350	0.16	—	—	—	Qmag
w_i	[0,180]	0.9	0.81	350	0.16	—	—	—	Qmag
Sistema de referencia	LVLH,Qmag	0.9	0.81	350	0.16	-0.481	-2.074	10.703	—

Tabla 3: Representación de las condiciones ambientales, propiedades ópticas y sistemas de referencia que se variaron, y las que se dejaron constantes para el estudio del comportamiento del modelo.

6.4. Implementación del modelo en Matlab

6.4.1. Precómputo de distancias

Basándose en la implementación del modelo SGP4 por Johnson (2017) en Matlab:

1. Para la propagación de la órbita del Quetzal-1 se utilizaron los TLE semanales para mejorar la precisión de la propagación.
2. El propagador se empleó para obtener las posiciones y velocidades del satélite entre datos TLE.
3. Finalmente, el propagador de órbitas genera estos datos en el sistema de referencia ECEF, por lo que el último paso fue hacer la conversión de sistema ECEF a ECI.

Por último, se recomienda generar las posiciones y velocidades con anterioridad presentadas, debido a que el modelo SGP4, aunque haga aproximaciones, en comparación de otros modelos, el algoritmo consume muchos recursos.

6.4.2. Cálculo de temperaturas

Habiendo obtenido las distancias y las velocidades anteriormente presentadas, se procedió a calcular otras cantidades, que son solamente dependientes de la posición y velocidad:

1. Tiempos de luz y sombra: se calculó mediante la función "eclipse" del CubeSat Toolbox.
2. Cuaternión: se asumió que el sistema de referencia se encuentra siempre alineado al campo magnético de la tierra. Esto implica que el cuaternión debe girar al satélite de tal forma, que sus ejes cartesianos queden alineados con dicho campo magnético. Esto, se hizo con la función QMAG implementada por (Alvarez Ruano, 2019).

Teniendo estas dos distancias, se procedió a emplear el algoritmo de predicción para temperaturas:

1. Se definieron las constantes del modelo: como el área del **satélite**, la **masa**, las constantes, referentes a las propiedades ópticas del cubesat; el porcentaje de **albedo**, la **temperatura** inicial y las velocidades angulares, junto con el cuaternión que las representa.
2. Luego, los vectores que representan el flujo solar se convirtieron de sistema ECI a sistema bodyframe, tanto en el flujo proveniente del sol como el de la tierra (**albedo**).
3. Habiendo definido toda la información, que el modelo de la ecuación 34 requería, se procedió a la resolución de la ecuación diferencial, mediante Runge-Kutta de grado 4. En este caso, Runge-Kutta resolvió la ecuación 34, por medio de una función que es la modificación de la función "RHSIsothermalCubeSat", para que esta acepte otras fuentes de calor externas, como el **albedo**.

Este proceso se empleó dos veces: primero, asumiendo que las constantes ópticas de la **superficie** eran las del panel solar y luego, asumiendo que las constantes ópticas son las del promedio ponderado de los materiales que conforman la **superficie** del Quetzal-1. Por último, cabe destacar que, para asumir el modelo isotérmico, se calculó el flujo sobre cada cara, pero en vez de resolver una ecuación por cada una, los flujos se sumaron y se resolvió solamente una ecuación, la cual es la ecuación **34**.

6.4.3. Estudio de distintos casos del modelo principal

Se procedió a estudiar tres casos para el modelo, aumentando la información que se suministra a este. Cuando se tomó en cuenta el **albedo**, se usó como 0.16 y cuando se estudió el giro, se emplearon los valores del Cuadro 1. La información que se suministró en cada caso se muestra a continuación:

Caso	Albedo	Giro
1	No	No
2	Sí	No
3	Sí	Sí

Tabla 4: Casos que se estudiaron para entender la evolución del modelo, empleando al aumentar la información que este tiene.

A manera de estudio de la **temperatura** registrada por el Quetzal-1 y las **temperaturas** simuladas, se generaron gráficas de **temperatura** vs tiempo, debido a que estas son más fáciles de visualizar y el tiempo es una medida indirecta de la posición.

7.1. **Temperaturas** medidas por el Quetzal-1

Se tomaron las **temperaturas** de los sensores de **temperatura** (BNO Y BNO055) a bordo del Quetzal-1. Y, a partir de esto, se graficó la **temperatura** a lo largo del tiempo, de manera general y local. A continuación se presenta las temperaturas medidas por ambos sensores y la temperatura promedio de estos dos:

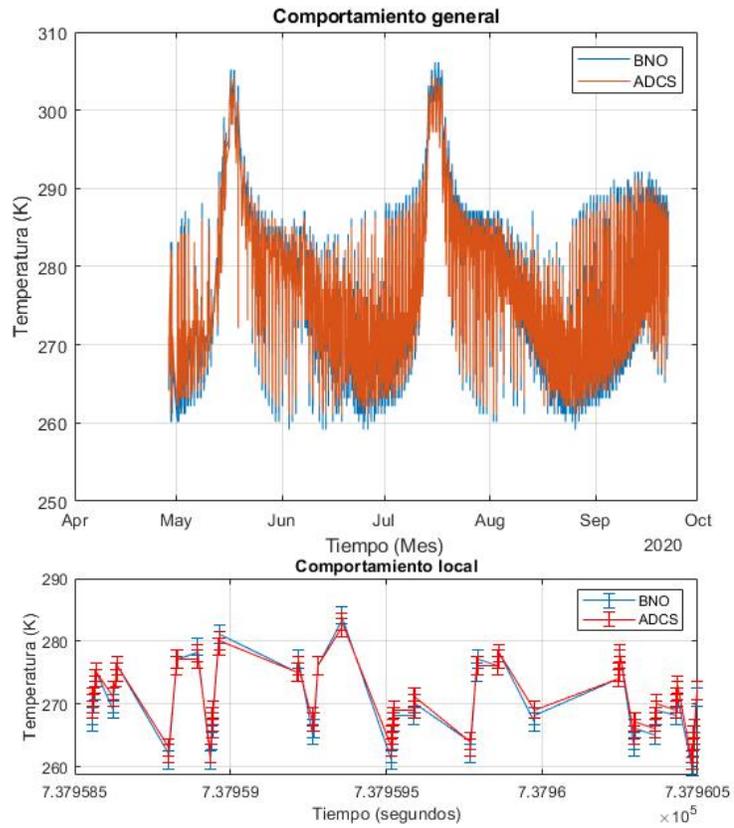


Figura 4: Temperaturas medidas por los sensores de temperatura a bordo del Quetzal-1, la figura superior representa la variación de temperatura del satélite a lo largo del tiempo y la figura inferior, el comportamiento de las temperaturas en un rango de aproximadamente 4 días.

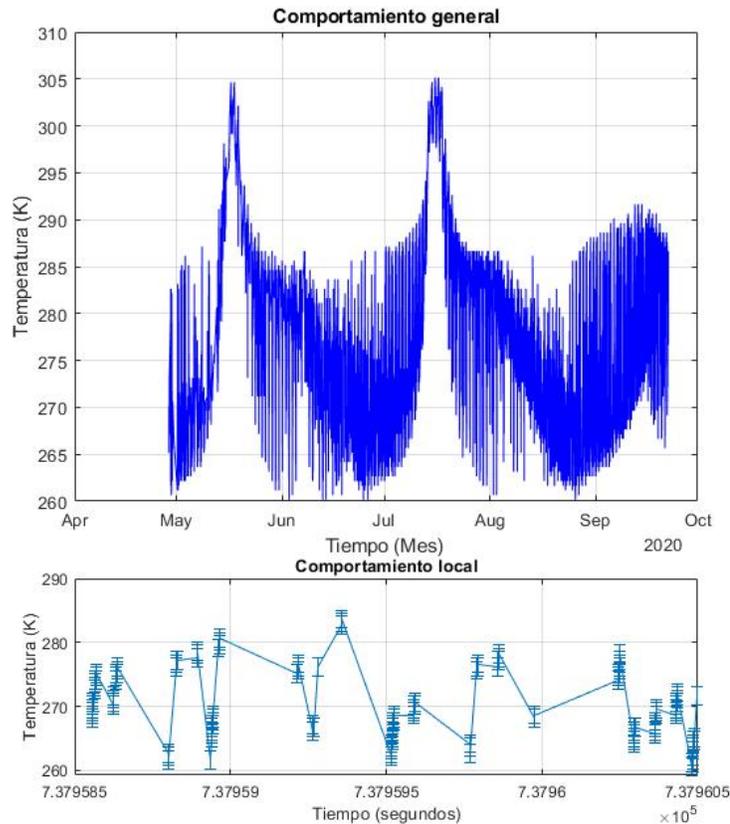


Figura 5: Temperatura promedio de las temperaturas medidas por los sensores de temperatura a bordo del Quetzal-1 (BNO Y BNO055). Donde la figura superior representa la variación de temperatura del satélite a lo largo del tiempo, mientras que la figura inferior es el comportamiento del promedio de las temperaturas medidas por los sensores de temperatura a bordo del Quetzal-1 en un rango de, aproximadamente, 4 días.

7.2. Datos obtenidos mediante el simulador

7.2.1. Simulación de la temperatura

Efectos de las propiedades ópticas en el modelo

Se variaron las tres propiedades ópticas, que se toman en cuenta en la ecuación 34, las cuales son : emisividad (ϵ), absorbanza (α) y calor específico (cp). En cada caso, se dejaron las constantes ópticas, condiciones ambientales y sistemas de referencia, como el Cuadro 3 indica. A continuación se presentan tres gráficas del efecto de la absorbanza, emisividad y calor específico en el modelo:

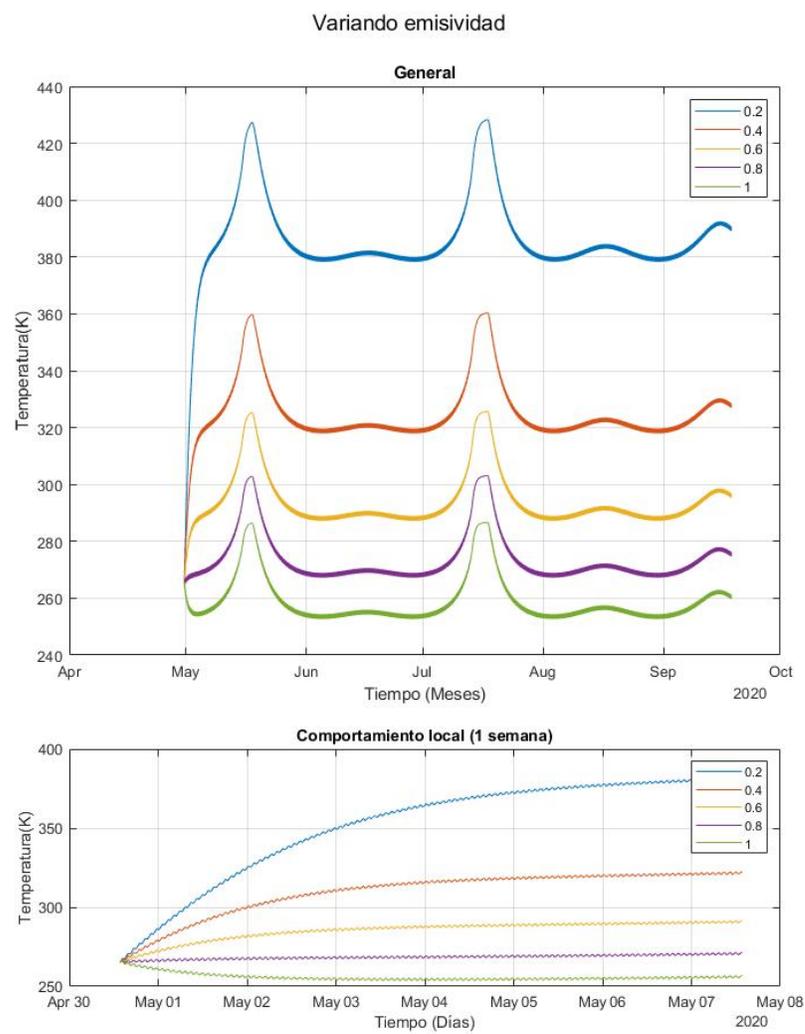


Figura 6: Efectos de la variación de la constante epsilon (emisividad) en el modelo.

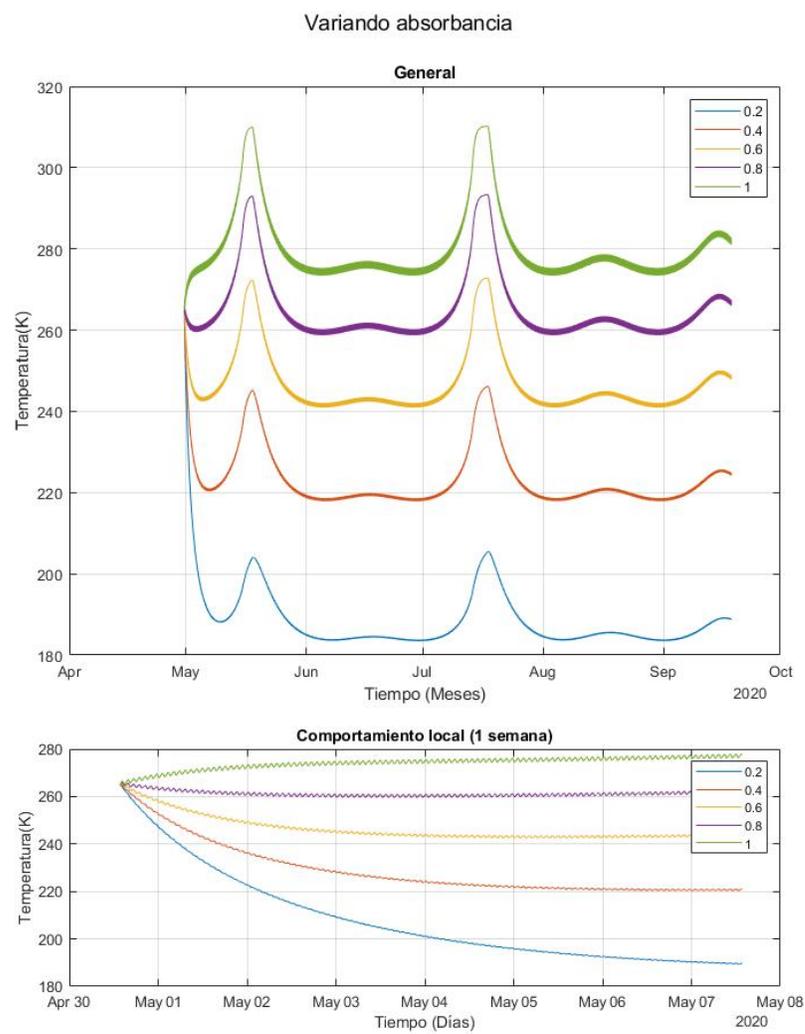


Figura 7: Efectos de la variación de la constante alpha (absorbancia) en el modelo.

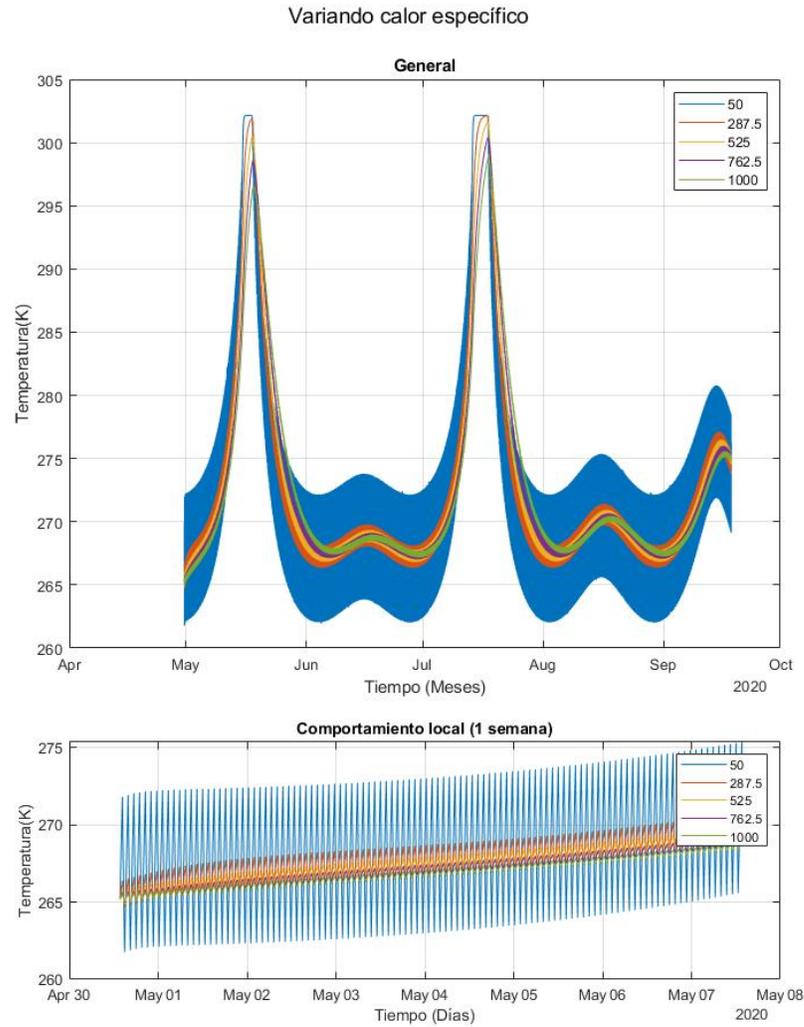


Figura 8: Efectos de la variación de la constante C_p (Calor específico) en el modelo.

Efectos del sistema de referencia en la simulación de la temperatura del Quetzal-1

Se varió el sistema de referencia al que el sistema Bodyframe se encuentra alineado. En cada caso, se dejaron las constantes ópticas y condiciones ambientales, como el Cuadro 3 indica. A continuación se muestra una gráfica con el comportamiento térmico de los 2 cuaterniones y una gráfica con el comportamiento térmico de los cuaterniones contra el comportamiento térmico medido por los sensores.

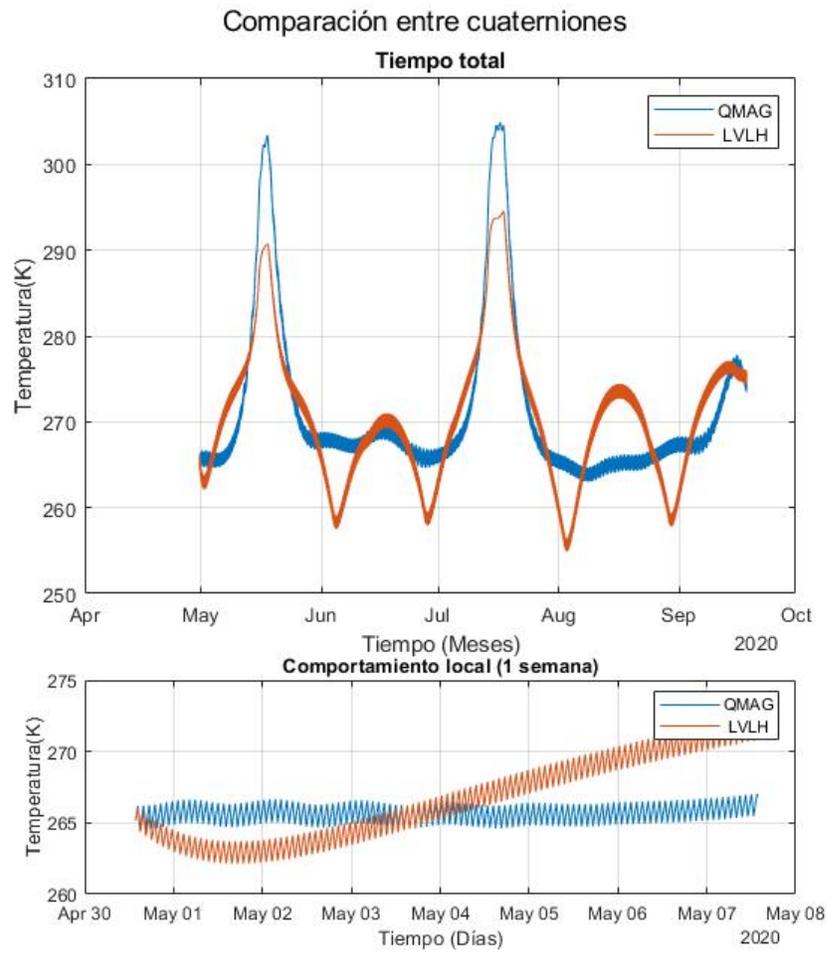


Figura 9: Comparación de dos simulaciones de la temperatura del satélite asumiendo que el sistema de referencia del Quetzal-1 está alineado al sistema LVLH y al campo magnético de la tierra.

Comparación entre cuaterniones y temperatura real

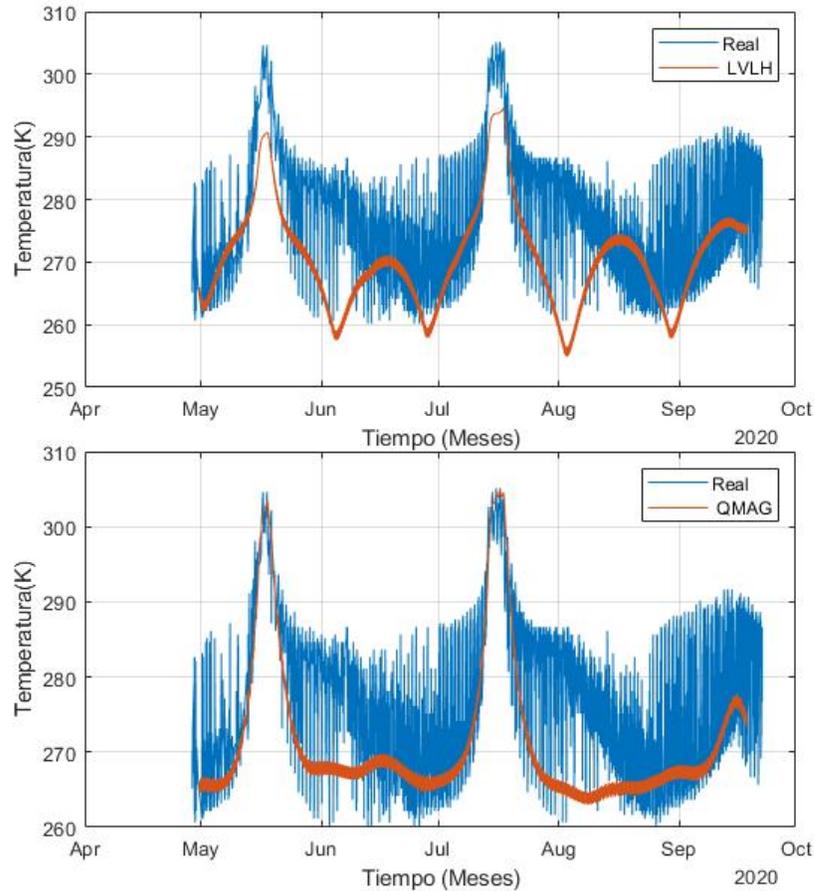


Figura 10: Comparación de dos simulaciones de la **temperatura** del **satélite** asumiendo que el sistema de referencia del Quetzal-1 está alineado al sistema LVLH y al **campo magnético** de la tierra con la **temperatura** promedio del Quetzal-1.

Efectos del albedo en la simulación de la **temperatura**

Se varió el factor del **albedo**. En cada caso, se dejaron las constantes ópticas y condiciones ambientales, como el Cuadro **3** indica.

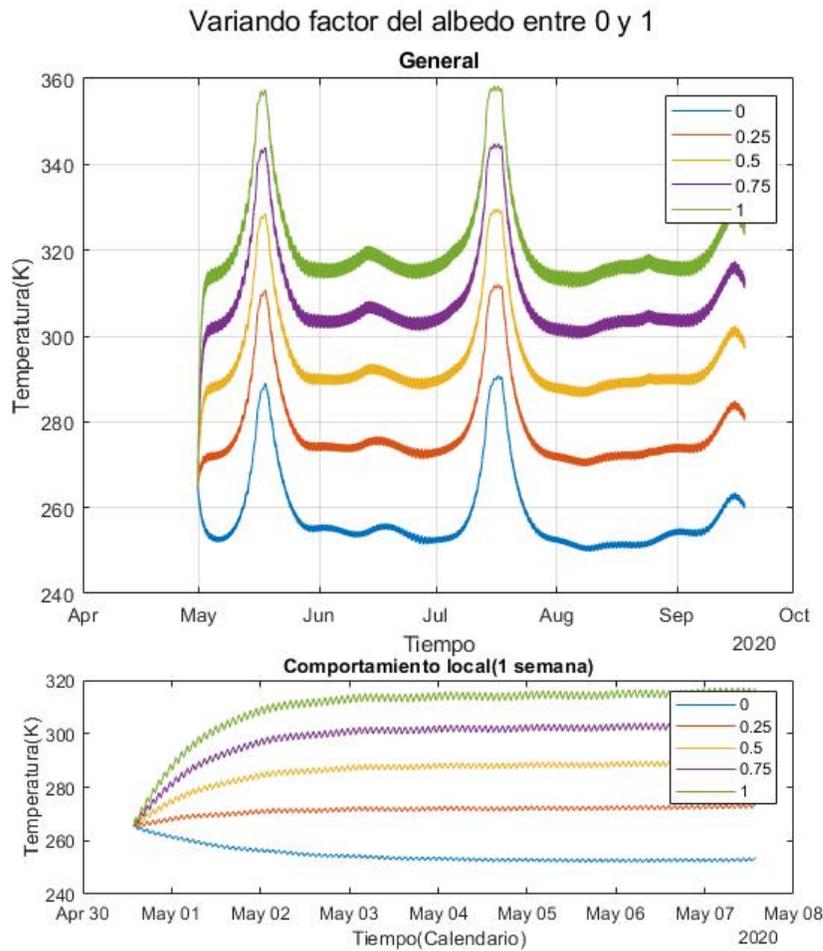


Figura 11: Variación del factor del albedo entre 0 a 1

Efectos de la **rotación** del **satélite** a velocidad constante

Se agregó una velocidad angular al **satélite**, la cual se agrega al giro que experimenta el sistema bodyframe por sí mismo, al alinearse al sistema Qmag. En cada caso, se dejaron las constantes ópticas y condiciones ambientales, como el Cuadro 3 indica y se graficó el comportamiento térmico asumiendo que la velocidad angular se encontraba entre 0 y 180 grados, luego se graficó asumiendo que su velocidad angular se encontraba entre -23 y 23 grados.

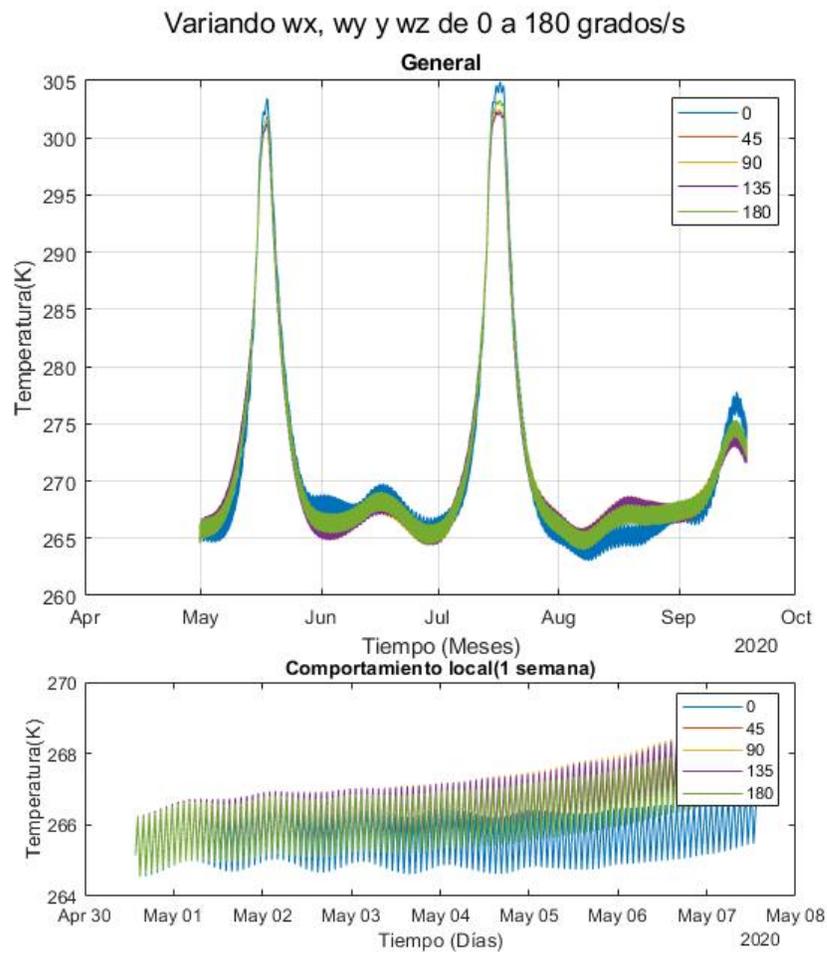


Figura 12: Variación del modelo térmico para el Quetzal-1, asumiendo que este gira en sus tres ejes cartesianos, a distintas velocidades angulares.

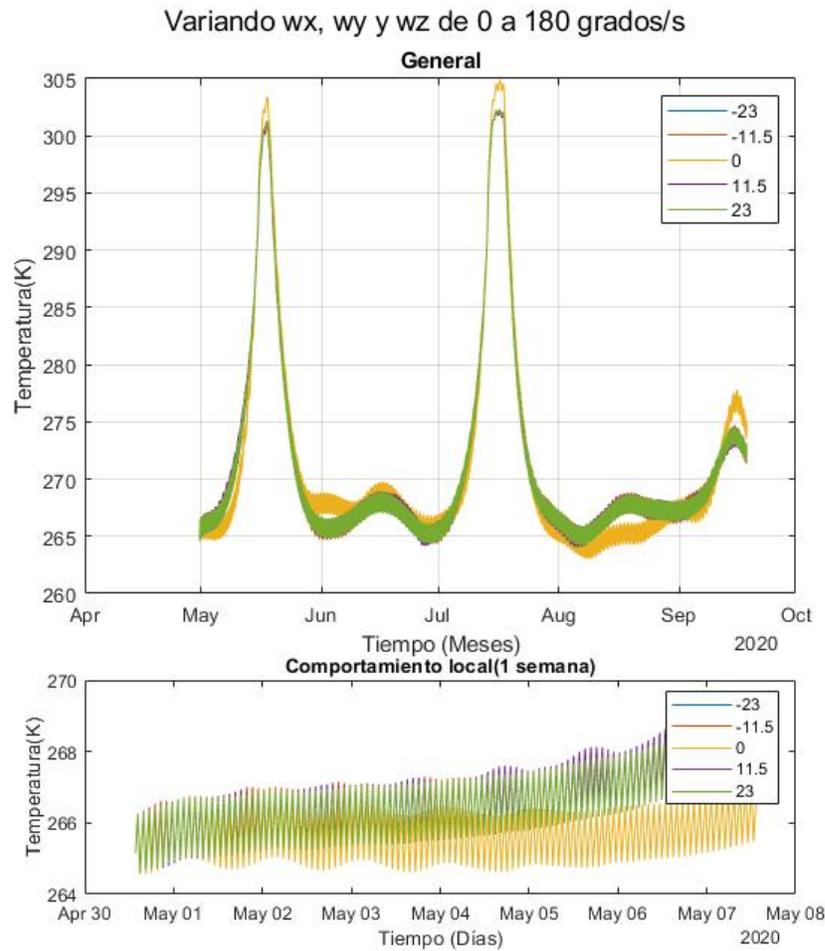


Figura 13: Variación del modelo térmico para el Quetzal-1, asumiendo que este gira en sus tres **ejes cartesianos**, a distintas velocidades angulares, entre -23 a 23 grados. Se utilizó este rango dado que se determinó que las velocidades angulares, medidas por el Quetzal-1, se encontraban entre estos rangos.

Simulación de la **temperatura** del Quetzal-1

Como punto de partida, se tomó el caso más sencillo, el cual es el caso 1 de la Tabla 4. Se estudió para los dos casos de propiedades ópticas de la Tabla 2 y se empleó el sistema Qmag. A continuación se muestra el comportamiento térmico sin tomar en cuenta el albedo y el giro, tomando en cuenta el albedo pero no el giro, tomando en cuenta el albedo y el giro, por último se comparó los tres modelos y se muestra una comparación de la información de los sensores con respecto al modelo que considera albedo y giro.

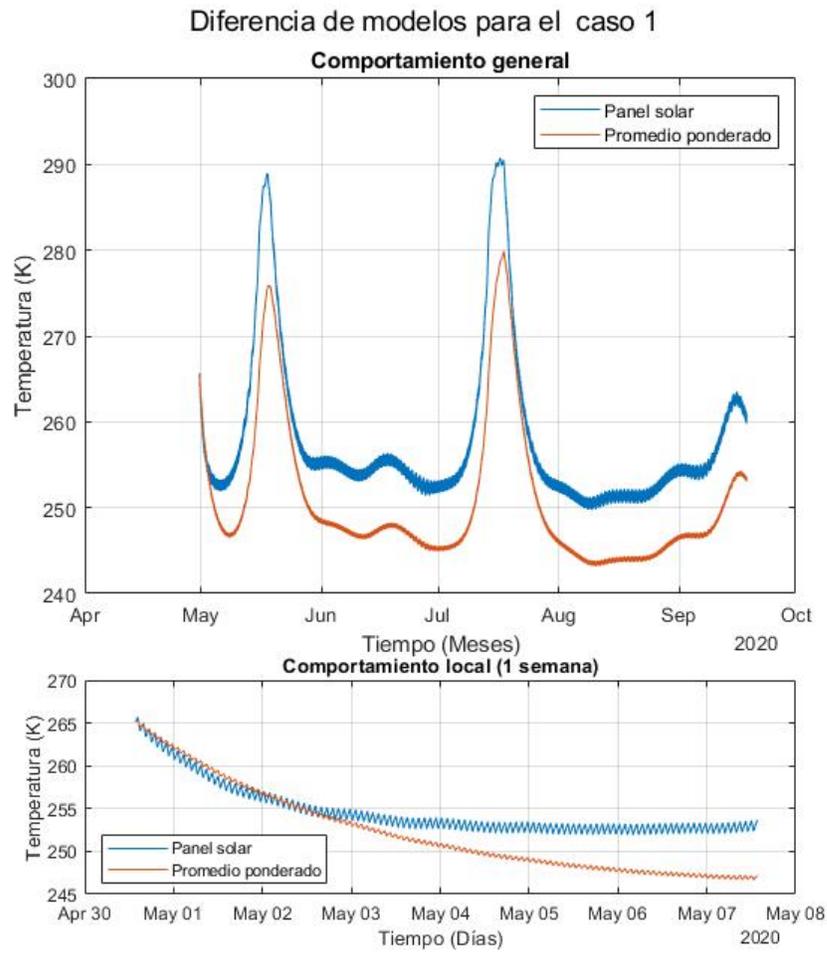


Figura 14: Simulación de la temperatura del Quetzal-1, tomando en cuenta solamente el efecto del flujo solar.

Se procedió a estudiar el caso 2 de la Tabla 4. Se estudió para los dos casos de propiedades ópticas de la Tabla 2 y se empleó el sistema Qmag.

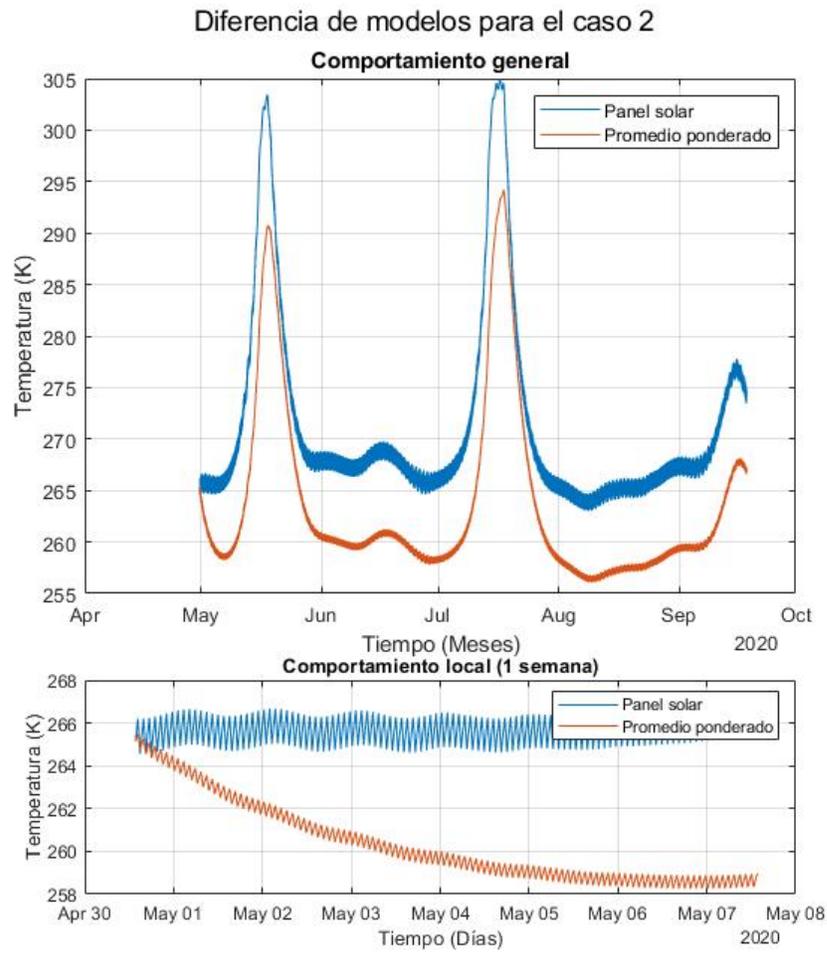


Figura 15: Simulación de la temperatura del Quetzal-1, tomando en cuenta el efecto del flujo solar y el albedo.

Por último, se estudió el caso más complejo, el cual es el caso 3 de la Tabla 4. Se estudió para los dos casos de propiedades ópticas de la Tabla 2 y se empleó el sistema Qmag.

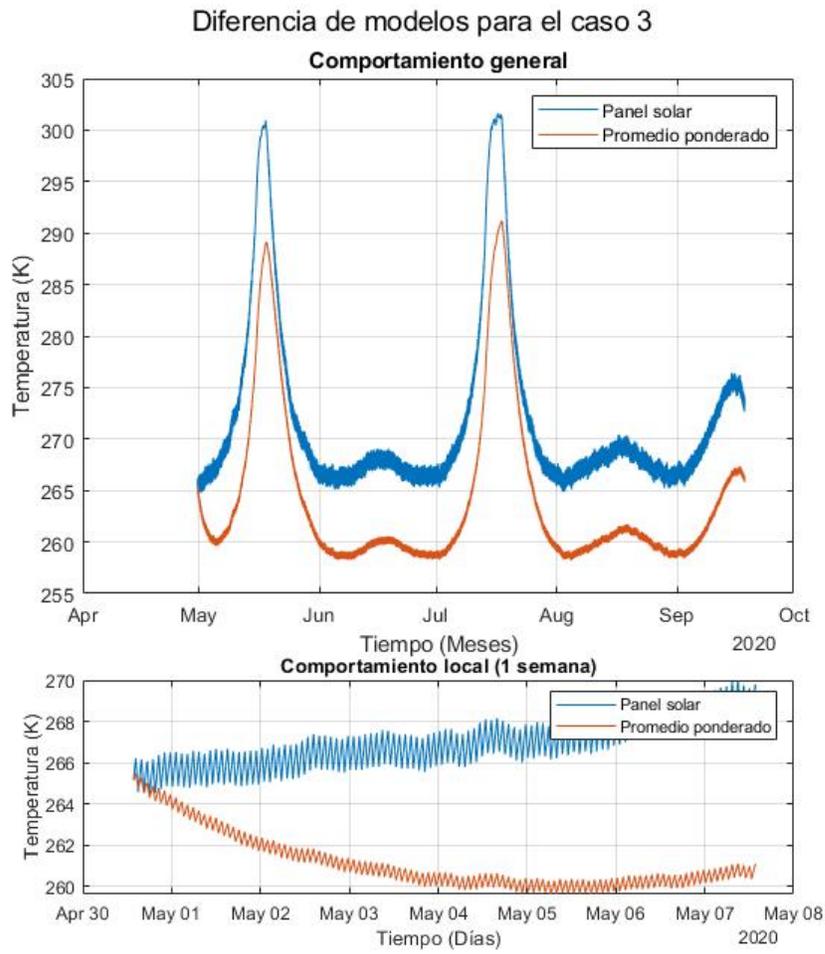


Figura 16: Simulación de la **temperatura** del Quetzal-1 tomando en cuenta el efecto del flujo solar, el **albedo** y el giro del **satélite**.

Usando los valores de las constantes ópticas de la **superficie** del Quetzal-1, como las del panel solar, que se muestran en la Tabla 2, se procedió a comparar los tres casos de la Tabla 4. Como se muestra a continuación:

Diferencias en la temperatura para los tres casos

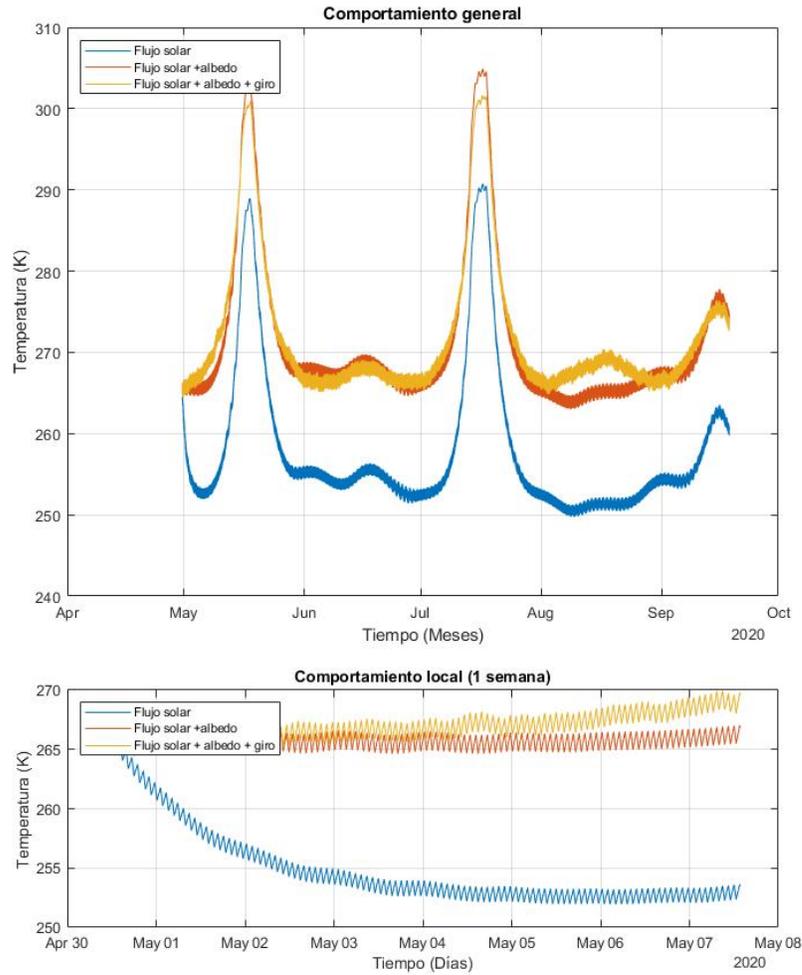


Figura 17: Comparación entre las tres simulaciones de la **temperatura** del Quetzal-1, asumiendo que las constantes ópticas de la **superficie** del Quetzal-1 son las pertenecientes al panel solar.

Asumiendo que los valores de las constantes ópticas de la **superficie** del Quetzal-1 son los promedios ponderados, que conforman dicha **superficie**, la cual muestran en la Tabla 2, se procedió a comparar los tres casos de la Tabla 4. Como se muestra a continuación:

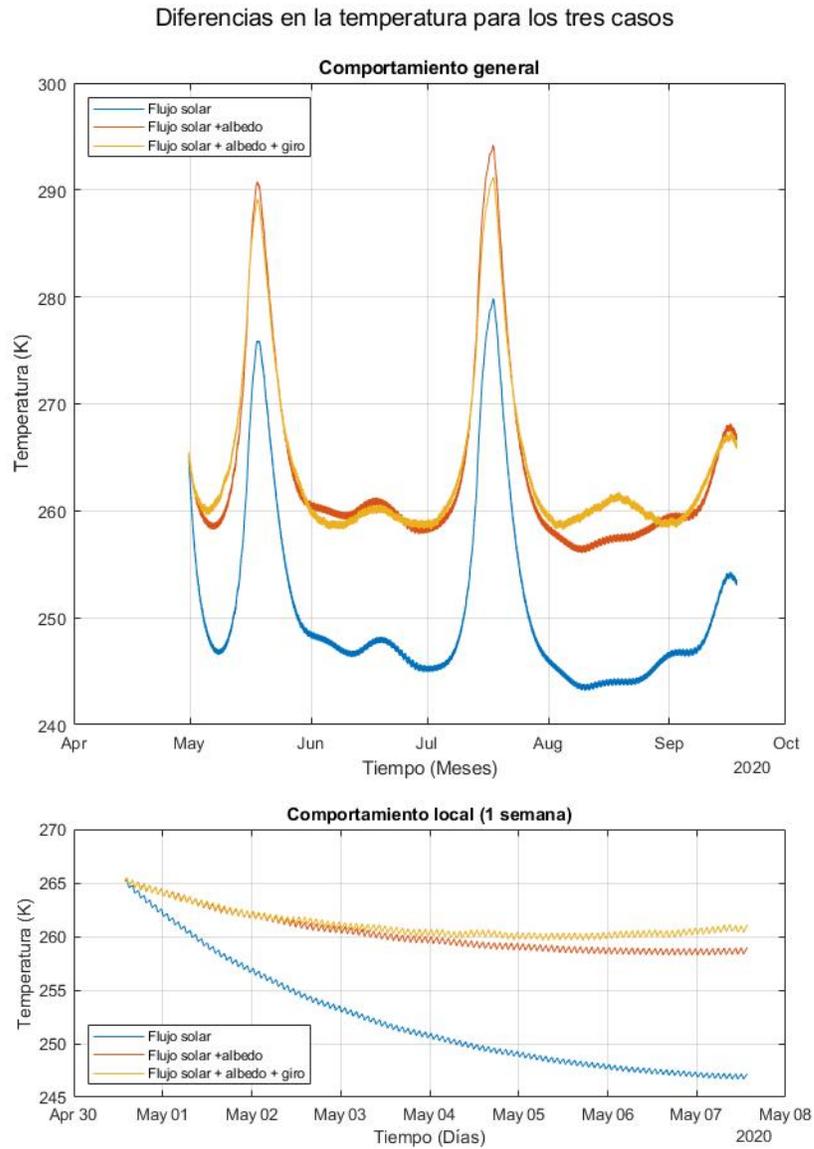


Figura 18: Comparación entre las tres simulaciones de la **temperatura** del Quetzal-1, asumiendo que las constantes ópticas de la **superficie** del Quetzal-1 son los promedios ponderados que conforman dicha **superficie**

Empleando el caso 3 de la Tabla 4, y asumiendo los valores de las constantes ópticas de la **superficie** del Quetzal-1, como el promedio ponderado de los materiales que conforman dicha **superficie** como se muestra en la Tabla 2, se procedió a comparar la **temperatura**, que el modelo isotérmico predice y la **temperatura** promedio, que los sensores abordo del Quetzal-1 registraron:

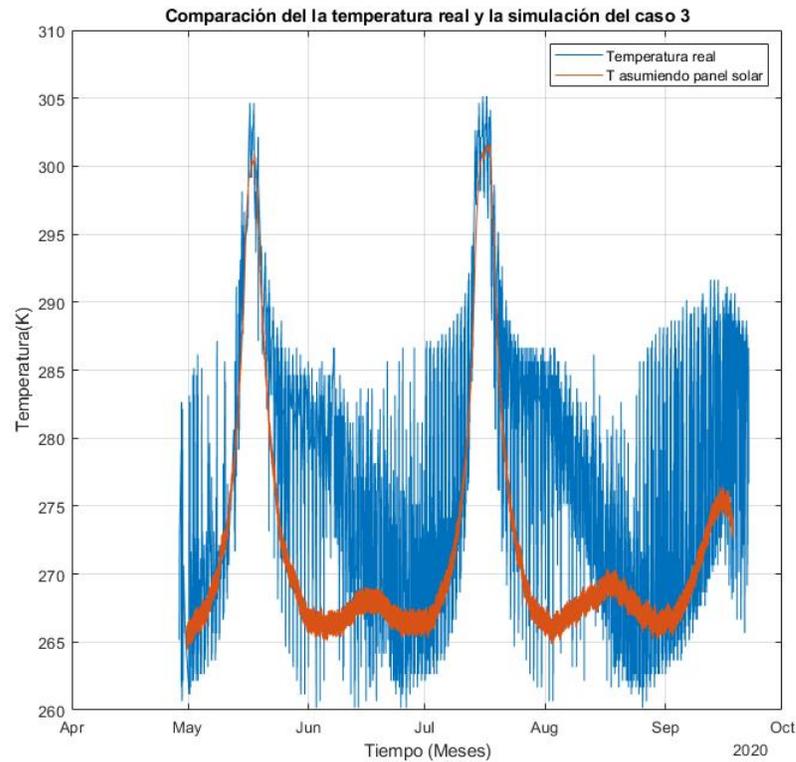


Figura 19: Comparación de la **temperatura** real con la **temperatura** simulada, tomando en cuenta el **albedo** y el giro y las constantes ópticas como las del panel solar.

Empleando el caso 3 de la Tabla 4 y asumiendo los valores de las constantes ópticas de la **superficie** del Quetzal-1 como el promedio ponderado de los materiales que conforman dicha **superficie**, cómo se muestra en la Tabla 2, se procedió a comparar la **temperatura** que el modelo isotérmico predice y la **temperatura** promedio que los sensores abordo del Quetzal-1 registraron.

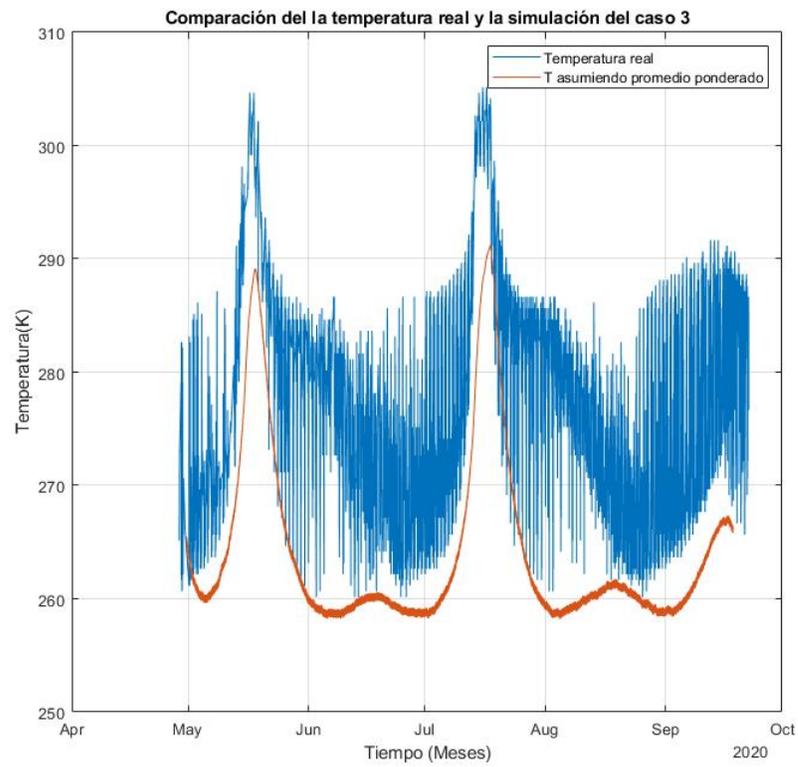


Figura 20: Comparación de la temperatura real con la temperatura simulada, tomando en cuenta el albedo y el giro y las constantes ópticas, así como el promedio ponderado de los materiales que conforman la superficie del Quetzal-1

8.1. Comportamiento térmico del Quetzal-1

A partir de la Figura 4, se aprecia que las oscilaciones de las temperaturas medidas por los sensores tienen amplitudes que varían, en algunos casos, desde los 5 K hasta el rango de los 20 K. Se podría suponer que el comportamiento general en la temperatura registrada por los sensores se debe al ruido que la señal pueda tener, sin embargo, se sabe que los sensores de temperatura tienen errores de unidades, por lo que no podría justificar las amplitudes tan grandes. Por otro lado, existen 2 periodos de tiempo en mayo y julio, en el que las temperaturas medias del satélite llegaron a 2 máximos. En estas zonas, la amplitud de oscilación disminuyó, por lo que las altas amplitudes, antes mencionadas, no se consideran como resultados de los errores de medición o de ruido en la señal.

Los máximos globales, antes mencionados, se deben a épocas en las que el Quetzal-1, se encontraba en una órbita con ángulo beta alto, lo que llevó a que el satélite recibiera luz solar directa, por un largo período de tiempo, y no tuviera oportunidad de liberar energía térmica en épocas de sombra. Con respecto a ello, es otra de las razones, por las cuales el modelo oscila tanto, dado que se calienta por un tiempo y, luego, al entrar en zonas de sombra, este permite que el satélite se enfríe; sin embargo, debido al período de la órbita en que se encuentra, sucede en múltiples ocasiones durante el día, dando la impresión de ruido, en la medición de la temperatura.

Se aprecia que las temperaturas medidas por los sensores de la computadora a bordo, y del sistema de control de actitud, no varían de manera significativa; por lo que, para un análisis más sencillo, se decidió trabajar con un promedio de estas temperaturas, como se muestra en la Figura 5. Se aprecia que el comportamiento general y local no varía, con respecto a las temperaturas individuales, además, que trabajar con una temperatura promedio, permite hacer una aproximación al modelo isotérmico que se planteó con anterioridad.

8.2. Comportamiento térmico predicho mediante la simulación

8.2.1. Efecto de la modificación de las variables ópticas en el modelo

La importancia de estudiar la variación de las variables ópticas fue la de plantear el alcance que estas podrían tener, a la hora de ajustar de mejor forma la simulación, al comportamiento real del Quetzal-1. Por lo tanto, se estudiaron tres casos: **emisividad**, **absorbancia** y **calor específico**

El primer caso estudiado es el de la **emisividad** (ϵ). Según la ecuación 34 y, como se planteó en el marco teórico, este es el factor que mide cuánto es la fracción del calor que el sistema va a poder liberar y, como se puede apreciar en la Figura 6, la variación de este factor provoca en el modelo, que la **temperatura** tenga un desfase horizontal. Por otro lado, se detectó que entre más pequeña es la **emisividad** del **satélite**, este almacena más calor y, por lo tanto, se calienta más, mientras que, entre más grande es la **emisividad**, el **satélite** se calienta menos, dado que permite al sistema liberar más calor.

Localmente, el comportamiento es el mismo, la relación de proporcionalidad inversa no es lineal y conforme se acerca a 1, las **temperaturas** de los distintos casos tienden a mostrar un corrimiento menor entre ellas, por lo que, se puede concluir que existe una cota superior en la cantidad de calor que el **satélite** puede liberar. Esto, se corresponde con que la materia no puede tener un valor mayor a 1 de **emisividad**.

El segundo caso para estudiar fue el de la **absorbancia**, sin embargo, como muestra la Figura 7, esta se comporta de manera inversa a la **emisividad**. Desfasándose de las **temperaturas**, pero, proporcionalmente, y exhibiendo, también, un comportamiento asintótico en su valor máximo.

El último caso, es el del **calor específico** (cp). En este caso, el **calor específico** no genera corrimientos en la función, sino al parecer, la amplitud de las oscilaciones es inversamente proporcional al aumento de esta constante, como se muestra en la Figura 8. Esto, se corresponde con que, entre más pequeño es el **calor específico**, más fácil es calentar un cuerpo. Se podría considerar que la elección de un cp , lo suficientemente bajo, puede llevar a una buena descripción de las oscilaciones, que la **temperatura** del Quetzal-1 exhibe; sin embargo, como se discutirá más adelante, bajo el modelo isotérmico y las aproximaciones, que este conlleva, no se encontró, algún valor de cp , que exhiba una alta oscilación, con amplitudes similares a las de los datos térmicos reales, y que, a su vez, se corresponda con alguna aproximación coherente de las constantes ópticas del Quetzal-1.

8.2.2. Efecto del uso de distintos sistemas de referencia

En la Figura 9, se aprecia que, definir que el sistema body frame se encuentra alineado no es trivial, dado que el modelo registra comportamientos en general distintos. En la Figura 9, vemos que el sistema LVLH da como resultado máximos globales más pequeños que el sistema QMAG, y mínimos globales y locales por debajo de los predichos con el sistema QMAG. También, parece que, entre máximos, el modelo parece predecir máximos locales, los cuales no se corresponden al comportamiento de la **temperatura** medida por el **satélite**. En la Figura 10, se aprecia, que, en términos generales, el modelo no parece percibir el comportamiento general de la **temperatura** real empleando el sistema LVLH.

En el caso del sistema QMAG, los máximos globales que el modelo predice poseen cambios en la **temperatura** menos abruptos y con menos máximos locales que el sistema LVLH. Con respecto

a la Figura 10 vemos que el modelo no se aproxima muy bien para temperaturas bajas, en especial, a la disminución de temperatura que el satélite tiene cuando sale de las zonas de ángulo beta alto. A pesar de esto, este sistema es al que se alineó el sistema bodyframe en la misión real y más importante aún, es que el modelo empieza a converger conforme la temperatura del satélite aumenta, debido al ángulo beta alto. Se puede apreciar, entonces, que, empleando este sistema de referencia, el modelo se corresponde con la realidad a altas temperaturas o un flujo de calor creciente.

Otro resultado importante de esto es que, parece ser que el problema del modelo no es debido al empleo de las constantes, sino, es sobre algún otro factor ambiental, estructural o dinámico del satélite. Dado que cuando el satélite sale de las épocas con ángulo beta alto, parece ser que lo hace con una pendiente más pequeña que la de la predicción y ésta pendiente no es constante en el tiempo, dado que, como se aprecia mejor, luego del segundo máximo global, la temperatura parece disminuir hasta llegar a una meseta para luego disminuir de manera más pronunciada. Esto, implica que existe un factor que no se tomó en cuenta en esta aproximación y que está relacionada con la disminución de la temperatura.

8.2.3. Efectos del factor del albedo en el modelo térmico

En este caso, los cambios no son tan dramáticos como los del cambio de sistema de coordenadas sino que son más parecidos a los de la modificación de las variables ópticas, en específico, a la emisividad y absorbanza, como se muestra en la Figura 11. El modelo parece no llegar a una cota superior cuando se aumenta el factor del albedo, aunque, si se aprecia, que el desfase vertical empieza a disminuir. Aunque, parece que cuando llega el factor del albedo a 1, dicho desfase no alcanza una cota. Esto es debido, a que en el modelo no existe ninguna restricción, por la cual, la reflexión de la Tierra sea del 100%. Solo capta que hay un flujo proveniente de la Tierra que calienta al satélite y que depende de las épocas de luz y sombra. Por lo tanto, si parece que este llega a una cota superior, esto se debe por a mecanismos propios del modelo térmico.

8.2.4. Efectos del giro en la simulación térmica del Quetzal-1

Como observamos en la Figura 12, variando la velocidades vemos que hay cierta diferencia entre el caso de velocidades angulares iguales a $0^\circ/s$ con las velocidades angulares mayores a 0. Sin embargo, si se analizan distintas velocidades angulares entre los mínimos y máximos que el satélite registró en sus velocidades de giro para los tres ejes cartesianos (Figura 13), se evidencia que el modelo parece tener cierta variación respecto al modelo sin giro. Ahora bien, puede ser que la distribución general de temperaturas varía levemente en la presencia de giro, pero, las gráficas 13 y 12 pretenden indicar que la distribución de temperaturas solo varía si la velocidad angular es distinta de 0, pero no cambia dramáticamente, para ángulos pequeños. Debido a este resultado, se decidió tomar en cuenta el giro, pero solo emplear los promedios de las velocidades angulares en los tres ejes cartesianos, como se muestra en la Tabla 1.

8.2.5. Comparación de la simulación térmica y la temperatura real

Habiendo definido como es que las principales constantes y variables presentes en la ecuación 34 afectan a la simulación, es fácil comprender los resultados de las figuras 14, 15, 16, 17 y 18. Donde la gráfica azul siempre está por encima y tiene una amplitud más grande que la gráfica anaranjada, debido a que al asumir que el material de la superficie del Quetzal-1 es panel solar, implica tener un cp menor (mayor amplitud) y un alpha mayor (corrimiento mayor), que asumiendo un promedio ponderado.

Ahora bien, como se aprecia en la Figura 20, emplear el promedio ponderado de los materiales no parece ser una opción viable para la predicción de las temperatura, debido a que no es captar las temperaturas máximas a las que el Quetzal 1 fue sometido. Esto, podría indicar que realmente el efecto de las propiedades ópticas de los materiales de la superficie del Quetzal-1 no jugaron un rol importante a la hora de modificar el comportamiento térmico del satélite a comparación del panel solar.

Como se aprecia en la Figura 19, si se asume que la superficie del satélite se encuentra conformada completamente por el panel solar permite una mejor aproximación a la temperatura real, en especial en las épocas sin sombra, esto probablemente es debido al sistema de referencia que se empleó. Se aprecia que, para las disminuciones de temperatura, el modelo no predice el comportamiento real que tuvo el satélite. Sin embargo, habiendo estudiado todas las variables y suministrando al modelo toda la información posible (Sistema de referencia, albedo y giro), se puede interpretar que en las épocas sin sombra el satélite podría aproximarse mejor a un comportamiento isotérmico, sin embargo, al salir de estas épocas, la forma en que las caras liberan energía y cómo las fuentes de flujo externo las calientan, pueden jugar un rol más importante, alejándose del comportamiento isotérmico.

A pesar de estas limitaciones del modelo, es importante remarcar que el mismo, aunque sea sencillo, es capaz de suministrar información referente a las épocas donde la temperatura aumente considerablemente, o las épocas en que el satélite estará más frío. Además, el principal fuerte del modelo es que es capaz de predecir, (incluyendo ciertos rangos de seguridad), las temperaturas máximas y mínimas que el satélite experimentará a lo largo de su misión y, por lo tanto, permite un mejor análisis para determinar el tipo de materiales, componentes y sensores que se llevarán a bordo.

- Basado en las simulaciones de la temperatura del Quetzal-1, se concluye que el objetivo principal del trabajo de graduación se cumplió, dado que se obtuvo un modelo coherente con las variaciones de temperatura orbitales, y, por lo tanto dependiente del tiempo, caracterizándolo mediante la variación de constantes ópticas y de condiciones ambientales.
- Se obtuvo un modelo que es capaz de aproximar en un plazo de una semana las temperaturas del Quetzal-1, permitiendo predecir las cotas superiores e inferiores de temperatura, que este va a sufrir, y relacionándolas directamente con la dinámica del mismo, alrededor de la tierra.
- Se consiguió caracterizar el modelo propuesto, comparándolo con los datos obtenidos en órbita, ya que se pudo describir las regiones, en las cuales, el modelo se apega más a la realidad, como en las épocas de ángulo beta alto, donde el modelo converge con las temperaturas recopiladas del Quetzal-1, dado al comportamiento, aproximadamente, isotérmico en dichas épocas, y a las regiones donde el modelo parece divergir, respecto a los datos reales, como en las épocas donde el ángulo beta es pequeño, y debido, probablemente, a que el satélite deja de comportarse isotérmicamente.

CAPÍTULO 10

Recomendaciones

En esta investigación se realizaron simulaciones, asumiendo que el comportamiento térmico del Quetzal-1 es isotérmico, debido al poco coste computacional que esto implica, como la base para modelos térmicos más precisos, que se puedan crear a futuro, tomando en cuenta los resultados y el comportamiento del modelo más sencillo. Por lo tanto, se recomienda para futuros estudios ir generando modelos más complejos, para así, ir interpretando el comportamiento térmico real del satélite.

Un ejemplo de esto es que el modelo propuesto fue capaz de converger bastante bien, con los datos reales para ángulos beta altos, sin embargo, para las disminuciones de temperaturas, este modelo no fue capaz de hacer una predicción correcta, por lo que, a futuro, se recomienda estudiar a qué régimen o qué modelo térmico se aproxima mejor a este caso.

Otro aspecto importante, es determinar con otros satélites tipo Cubesat, el desempeño térmico del modelo y comparar las condiciones ambientales y estructurales de los satélites, para dar más validez al modelo empleado.

- Albedo data. (s.f.). <https://solargis.com/docs/methodology/albedo>
- Alvarez Ruano, D. I. (2019). Cubesat Phase : 5 Module : Attitude Determination and Control System.
- Analytical Graphics, I. (s.f.). Satellites - Orbits - Propagators. Consultado el 29 de abril de 2021, desde https://help.agi.com/stk/11.0.1/Content/stk/vehSat_orbitProp_choose.htm
- Bloise, N., Capello, E., Dentis, M., & Punta, E. (2017). Obstacle avoidance with potential field applied to a rendezvous maneuver. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/app7101042>
- de la Peña, L. (1996). *Introducción a la mecánica cuántica* (3^o Edición). Fondo de Cultura Económica USA.
- Elhady, A. M. (2010). Design and analysis of a LEO micro-satellite thermal control including thermal contact conductance. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/AERO.2010.5446763>
- Garzón, A., & Villanueva, Y. A. (2018). Thermal analysis of satellite libertad 2: A guide to cubesat temperature prediction. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 10. <https://doi.org/10.5028/jatm.v10.1011>
- Gilmore, D. G. (2002). *Spacecraft thermal control handbook. Volume I, Volume I* (Vol. 1). <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSTCHVFT2/spacecraft-thermal-control>
- Grewal, M., Weill, L., & Andrews, A. (2007). *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, Second Edition*. <https://doi.org/10.1002/9780470099728.ch3>
- Griffiths, D. J. (2017). *Introduction to Electrodynamics* (4.^a ed.). Cambridge University Press.
- H. S. Carslaw, J. C. J. (1959). *Conduction of Heat in Solids* (2.^a ed.). Oxford University Press, USA.
- Johnson, J. M. (2017). Naval postgraduate. *Security*, (June), 1-55.
- Khaniki, H. B., & Hossein Karimian, S. M. (2014). Determining the heat flux absorbed by satellite surfaces with temperature data. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(6), 2393-2398. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0531-6>
- Kuipers, J. B. (2020). Quaternion Algebra. *Quaternions and Rotation Sequences*, 103-140. <https://doi.org/10.2307/j.ctvx5wc3k.10>
- Lienhard, J. H. I., & Lienhard, J. H. V. (2020). A Heat Transfer Textbook, fifth edition.
- Mahooti, M. (2020). SGP4. https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62013-sgp4?s_tid=srchtitle
- Markley, F. L., & Crassidis, J. L. (2014). *Fundamentals of spacecraft attitude determination and control*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0802-8>
- Paluszek, M., Bhatta, P., Griesemer, P., Mueller, J., & Thomas, S. (2012). *Elementary Loop Compensation* (Vol. 1).

- Paluszek, M., Bhatta, P., Griesemer, P., Mueller, J., Thomas, S., & Systems, P. S. (s.f.). *S Pacecraft* (Vol. 2).
- Pisacane, V. L. (2005). *Fundamentals of Space Systems Second Edition Edited by*.
- Sumanth, R. M. (2019). Computation of eclipse time for low-earth orbiting small satellites. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 6(5). <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2019.1412>
- Zea, L., Ayerdi, V., Argueta, S., & Muñoz, A. (2016). A Methodology for CubeSat Mission Selection. *Journal of Small Satellites, JoSS*, pp. 483-511.

CAPÍTULO 12

Anexos

Absorbancia: Trata de la medida que refleja cómo se atenúa la radiación cuando atraviesa un elemento. [6](#), [14](#), [20](#), [25](#), [27](#), [42](#), [43](#)

Aceleración: Es el nombre que le damos a cualquier proceso en donde la velocidad cambia. [12](#)

Albedo: Es la reflectividad de la superficie terrestre y se refiere a la energía reflejada desde la Tierra al universo. La radiación total (radiación global) que llega a la superficie terrestre se compone de la suma de la radiación solar (la más importante) y la radiación difusa del universo. [14](#), [15](#), [18](#), [20](#), [22](#), [30](#), [35](#), [36](#), [39](#), [40](#), [43](#), [44](#)

Arrastre atmosférico: En dinámica de fluidos, la resistencia o fricción de fluido, incorrectamente denominada en ocasiones como arrastre, es la fricción entre un objeto sólido y el fluido (un líquido o gas) por el que se mueve. [12](#)

Calor específico: La capacidad calorífica específica, calor específico o capacidad térmica específica es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad; esta se mide en varias escalas. [5](#), [16](#), [20](#), [25](#), [42](#)

Campo magnético: Los campos magnéticos se producen por cualquier carga eléctrica producida por los electrones en movimiento y el momento magnético intrínseco de las partículas elementales asociadas con una propiedad cuántica fundamental, su espín. [7](#), [17](#), [21](#), [29](#), [30](#)

Cartesianas: Las coordenadas cartesianas o coordenadas rectangulares (sistema cartesiano) son un tipo de coordenadas ortogonales usadas en espacios. [5](#), [7](#)

Centro geométrico: En la física, además del centro de gravedad aparecen los conceptos de centro de masa y de centro geométrico o centroide que, aunque pueden coincidir con el centro de gravedad, son conceptualmente diferentes. [8](#)

Coductividad: La conductividad eléctrica (símbolo σ) es la medida de la capacidad de un material o sustancia para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él. Se trata de una propiedad física que disponen aquellos objetos capaces de transmitir la electricidad o el calor. [5](#)

Coordenada: Se conoce como sistema de coordenadas al conjunto de los valores que permiten identificar de manera inequívoca la posición de un punto en un espacio euclídeo (un tipo de espacio geométrico). [5](#), [7](#), [43](#)

Dimensiones: Magnitud que, junto con otras, sirve para definir un fenómeno físico; especialmente, magnitud o magnitudes que se consideran en el espacio para determinar el tamaño de las cosas. [8](#), [10](#)

Ejes cartesianos: Son un par de rectas reales perpendiculares que nos permiten identificar los distintos puntos del plano. Identificaremos un punto cualquiera mediante un par de números y , y escribiremos $P = (a, b)$ Los distintos ejes tienen nombres propios: El eje horizontal es el eje de abscisas. [8](#), [18](#), [21](#), [32](#), [33](#), [43](#)

Electromagnética: El electromagnetismo es la rama de la física que estudia y unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría. El electromagnetismo describe la interacción de partículas cargadas con campos eléctricos y magnéticos. [6](#), [20](#)

Emisividad: Llamada antiguamente emitancia, es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura. [6](#), [15](#), [16](#), [20](#), [25](#), [26](#), [42](#), [43](#)

Energía: El término energía tiene diversas acepciones y definiciones, relacionadas con la idea de una capacidad para obrar, surgir, transformar o poner en movimiento. En física, energía se define como la capacidad para realizar un trabajo. En tecnología y economía, «energía» se refiere a un recurso natural. [4](#), [6](#), [14](#), [15](#), [41](#), [44](#)

Ensamblaje: El ensamblaje o ensamble es un proceso en el cual se consigue la tridimensionalidad colocando diferentes objetos muy próximos unos a otros. El ensamblaje es una técnica hermana del collage. [8](#)

Equinoccio vernal: Los equinoccios (del latín *aequinoctium* (*aequus nocte*), "noche igual") son los momentos del año en los que el sol está situado en el plano del ecuador celeste. También se suele llamar a este punto o nodo equinoccio vernal. [7](#)

Excentricidad: La excentricidad (épsilon) de una elipse es la razón entre su semidistancia focal (longitud del segmento que parte del centro de la elipse y acaba en uno de sus focos), denominada por la letra c , y su semieje mayor. Su valor se encuentra entre cero y uno. [10](#)

Factor de reflexión: El factor de reflexión (FR) indica el porcentaje de luz que se refleja. Al reflejar, devuelve la imagen al medio en mayor o menor proporción según sus propias características. El factor de reflexión (FR) se obtiene dividiendo la cantidad de luz que se refleja por la que incide sobre la superficie. [12](#)

Flujo térmico: El flujo de calor o flujo térmico, a veces también conocido como densidad de flujo de calor o intensidad de velocidad de flujo de calor es un flujo de energía por unidad de área por unidad de tiempo. En SI, sus unidades son vatios por metro cuadrado. [16](#)

Frecuencia: Frecuencia es la medida del número de veces que se repite un fenómeno por unidad de tiempo. La frecuencia en los fenómenos ondulatorios, tales como el sonido, las ondas electromagnéticas (como las de la radio o la luz), señales eléctricas u otras ondas, expresa el número de ciclos que se repite la onda por segundo. [6](#), [13](#)

Gravedad: La gravedad es un fenómeno natural por el cual los objetos con masa son atraídos entre sí, efecto mayormente observable en la interacción entre los planetas, galaxias y demás objetos del universo. [7](#), [9](#), [13](#)

Isotérmico: Se denomina proceso isotérmico o proceso isoterma al cambio reversible en un sistema termodinámico, siendo en dicho cambio la temperatura constante en todo el sistema. [6](#)

Julios: El julio o joule es la unidad derivada del Sistema Internacional utilizada para medir energía, trabajo y calor. Como unidad de trabajo, el julio se define como la cantidad de trabajo realizado por una fuerza constante de un newton en un metro de longitud en la misma dirección de la fuerza. [4](#)

Longitud: La longitud es un concepto métrico definible para entidades geométricas sobre las que se ha definido una distancia. Más concretamente, dado un segmento, curva o línea fina, se puede definir su longitud a partir de la noción de distancia. [6](#) [11](#)

Magnitud: La magnitud es una medida asignada para cada uno de los objetos de un conjunto medible, formados por objetos matemáticos. La noción de magnitud concebida así puede abstraerse a objetos del mundo o propiedades físicas que son susceptibles de ser medidos. [5](#) [9](#) [12](#)

Masa: En física, masa es una magnitud física y propiedad general de la materia que expresa la inercia o resistencia al cambio de movimiento de un cuerpo. De manera más precisa es la propiedad de un cuerpo que determina la aceleración del mismo, cuando este se encuentra bajo la influencia de una fuerza dada. [9](#) [10](#) [12](#) [16](#) [20](#) [22](#)

Onda: Para la física, una onda (del latín unda) consiste en la propagación de una perturbación de alguna propiedad del espacio, por ejemplo, densidad, presión, campo eléctrico o campo magnético, implicando un transporte de energía sin transporte de materia. El espacio perturbado puede contener materia (aire, agua, etc.) o no (vacío). [6](#)

Orientación: Orientación es la acción de ubicarse o reconocer el espacio circundante y situarse en el tiempo. La palabra orientación proviene de la palabra "oriente". [8](#) [10](#)

Perpendicular: En geometría, la condición de perpendicularidad es cuando una línea recta corta a otra formando un ángulo recto, el cual mide 90° . La perpendicularidad es una propiedad fundamental estudiada en geometría y trigonometría, por ejemplo, en los triángulos rectángulos, que poseen 2 segmentos «perpendiculares». [7](#)

Reflectancia: La reflectancia mide, en óptica, la capacidad de reflejar parte de la luz incidente en una superficie o material dado. Siendo así la relación entre la intensidad del flujo radiante reflejado y la intensidad del flujo radiante incidente, es una magnitud adimensional. [6](#) [14](#)

Rotación: es el movimiento de cambio de orientación de un cuerpo o un sistema de referencia de forma que una línea (llamada eje de rotación) o un punto permanece fijo. Cuando el eje pasa por el centro de masa o de gravedad se dice que el cuerpo «gira sobre sí mismo». [8](#) [9](#) [31](#)

Satélite: En el contexto de los vuelos espaciales, un satélite es un objeto que ha sido puesto en órbita intencionadamente. Estos objetos se llaman satélites artificiales para distinguirlos de los satélites naturales, como la Luna de la Tierra. [5](#) [8](#) [15](#) [18](#) [22](#) [24](#) [25](#) [29](#) [31](#) [36](#) [41](#) [44](#)

Superficie: Parte más externa de un cuerpo que lo limita o separa de lo que lo rodea. [5](#) [6](#) [12](#) [14](#) [15](#) [19](#) [20](#) [22](#) [36](#) [40](#) [43](#) [44](#)

Temperatura: La temperatura es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, de un objeto o del medio ambiente en general, medida por un termómetro. [5](#) [6](#) [15](#) [17](#) [19](#) [25](#) [28](#) [30](#) [33](#) [44](#)

Teorema: Derivada del latín theorema, la palabra teorema consiste en una proposición que puede ser demostrada de manera lógica a partir de un axioma o de otros teoremas que fueron demostrados con anticipación. [9](#)

Transmitancia: La transmitancia óptica se refiere a la cantidad de luz que atraviesa un cuerpo, en una determinada longitud de onda. Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo traslúcido, una parte de esa luz es absorbida por el mismo, y otra fracción de ese haz de luz atravesará el cuerpo, según su transmitancia. [6](#)

Watts: El vatio (W) es la unidad de medida de la potencia eléctrica en el Sistema Internacional de Unidades, que equivale a la producción de 1 julio por segundo (1J/s). El vatio o Watt mide la velocidad a la que puede transformarse la energía. ... El motivo es muy sencillo, watts denomina, en inglés, a los vatios. [4](#)

Órbita: En física, una órbita es la trayectoria que describe un objeto físico alrededor de otro mientras está bajo la influencia de una fuerza central, como la fuerza gravitatoria. [5](#) [7](#) [9](#) [14](#) [18](#) [19](#) [21](#) [41](#)