

PREDISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE ACTITUD PASIVO PARA EL PEHUENSAT-2

Jorge Lassig^{1*}, Nicolás Jiménez, y Diego Barale

Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Bs.As. 1400 – (8300) Neuquén

Palabras clave: satélite, control de actitud, boom, diseño.

Resumen: El PehuenSat-2 será un satélite categoría micro, de 12 Kg de masa. Una de las misiones será tomar imágenes de la Tierra con aplicación meteorológica, para ello la cámara deberá “apuntar” hacia la superficie terrestre, en particular cuando su órbita transite sobre territorio Argentino.

En este trabajo se ha evaluado la posibilidad de lograr un control pasivo de actitud utilizando el gradiente de gravedad, por medio de un “boom”.

Para ello se ha realizado un análisis estadístico de satélites que han utilizado este tipo de control, lográndose curvas para su prediseño.

Se cuantifican las variables intervinientes en el diseño (momentos de inercia, centro de masa, relación masa del satélite vs masa del boom, largo del boom, etc.), se determina el torque restitutivo y el grado de estabilidad de la configuración adoptada.

* **Autor A:** lassig@uncoma.edu.ar, Departamento Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería UNComahue, Bs.As. 1400, (8300) Neuquén, Argentina. Tel.: 0054 299 4490322.

1.- INTRODUCCIÓN

Los sistemas de estabilidad de actitud pasiva por gradientes de gravedad (denominados boom), fueron usados en un principio por la NASA en satélites de órbita baja (LEO) en los finales de la década de 1960', con un éxito relativo, debido en parte a su poco conocimiento sobre el funcionamiento de los mismos, y a las limitadas herramientas de cálculo en esa época (Kershner, 1963).

Posteriormente, con la experiencia adquirida en ensayos y con el aumento de las capacidades informáticas en la década de los 1990', que dieron lugar a medios más exactos para resolver las ecuaciones diferencial ordinarias, se demostró que el control de actitud pasivo es un medio valioso, principalmente porque consume poca o ninguna energía eléctrica, pues la energía está almacenada principalmente en resortes para su despliegue, y una vez desplegado no requiere ningún medio de energía, dependiendo sólo de las leyes de la astrofísica y la mecánica orbital. Por lo que muchos satélites pequeños en órbitas LEO han empleado el uso de estos boom.

La estructura de un boom consiste en una masa que está “atada” al satélite. El boom contiene un sistema de despliegue que, una vez que el satélite está en el espacio, desplaza la estructura que sostiene a la masa en un extremo.

El boom puede ser una estructura rígida como un larguero, o puede extenderse con un cable. Las longitudes del boom varían desde algunos metros (en satélites pequeños) hasta centenares de metros cuando se lo utiliza como tether (Lorenzin et all, 1989), dependiendo de la órbita, la masa del satélite, y de la masa extendida.

La masa del boom puede variar, pero suele ser generalmente un porcentaje pequeño de la masa de total del satélite, aproximadamente entre 5 á 10 por ciento (Oehrig et all, 2001).

Un boom trabaja en base a las Leyes de Newton de Gravitación Universal (ec.1), donde la fuerza de gravedad es inversamente proporcional a la distancia entre los dos objetos, y por fuerza centrífuga (ec.2).

$$F_G = G \cdot m_1 \cdot m_T / R^2 \quad (1)$$

$$F_C = m_1 \cdot R_1 \cdot \omega^2 \quad (2)$$

Donde G es la constante gravitacional universal, m_T la masa de la Tierra, m_1 la masa del objeto (satélite y/o boom), R el radio orbital medido desde el centro de la Tierra,

El boom se envía al espacio como parte de la estructura total del satélite. Cuando el satélite se eyecta desde el vehículo de lanzamiento, la fuerza de gravedad actúa igualmente sobre el boom y el satélite, porque el boom está almacenado dentro del mismo durante el despegue (lanzamiento).

El satélite y el boom tienen ahora un paso orbital característico: tiene una altitud específica, una velocidad orbital, y una excentricidad. Luego el boom se despliega por sobre el satélite (a una distancia mayor desde la Tierra, que del cuerpo principal del satélite).

Las dos masas, la del satélite y la del boom, respectivamente, se mueven cada una respecto del centro de masas del sistema.

Por otra parte el campo gravitatorio no es uniforme sobre el conjunto satélite-boom, la gravedad es ligeramente más intensa hacia la Tierra.

La figura 1 ilustra la diferencia entre los dos. También muestra los diferentes tipos de fuerzas que experimenta el sistema.

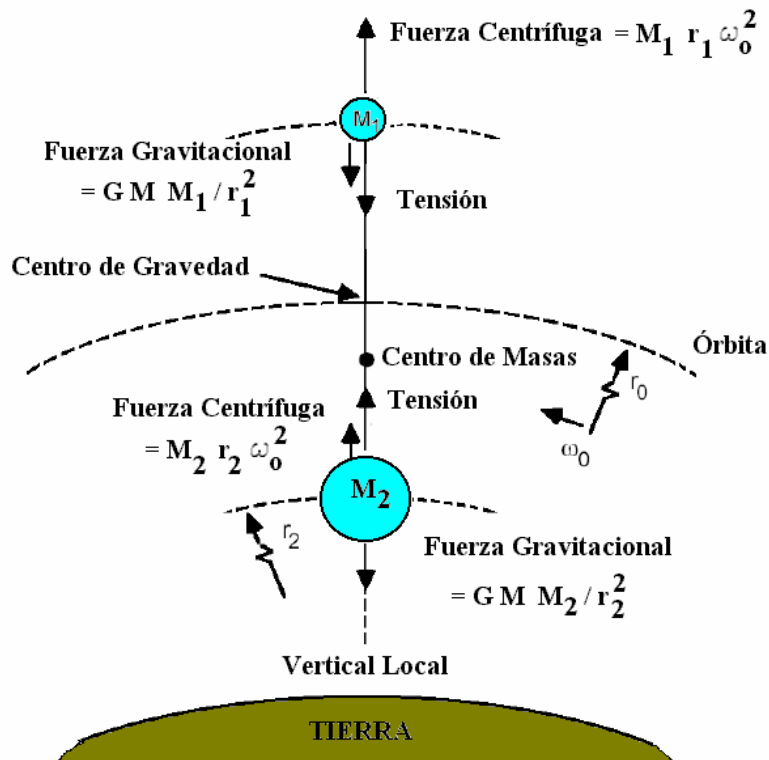


Figura:1: Fuerza gravitatoria

Cuando la masa del boom se despliega del satélite, se experimenta una reacción igual y opuesta, y mueve su anterior plano orbital mientras la masa del boom se mueve encima del satélite. Los dos todavía están conectados y esta conexión boom-satélite les permite continuar actuando como un sólo sistema.

La masa del boom tiene ahora una elevación mayor que el satélite, experimentando una fuerza gravitatoria menor que el satélite.

Por otra parte el satélite experimenta una fuerza centrífuga más baja que la del boom.

La razón por la que el boom tiene una fuerza centrífuga mayor, se debe al hecho que las dos masas, el satélite y la del extremo, está viajando en el mismo plano vertical aunque el boom está más lejos, más alejado de la Tierra.

Esta fuerza, causará una tensión en la conexión entre el satélite y el boom. Esta fuerza centrífuga es causada por la velocidad angular adquirida ω .

$$\omega = \sqrt{\frac{M_T \cdot G}{R^3}} \quad (3)$$

El sistema mostrado en la figura 1 está en equilibrio (no está oscilando). Esto es porque el centro de masa del satélite, masa del boom y la Tierra están todos alineados entre sí. El gradiente de gravedad está actuando en el satélite y en el boom en la misma línea. No hay ningún vector horizontal del gradiente gravitatorio en esta figura. Este ejemplo nunca se da, sobre todo cuando el sistema se despliega. Cuando el boom se despliega hay fuerzas dinámicas, de vibración, y fuerzas atmosféricas que actúan en el satélite, por consiguiente nunca estará en equilibrio total.

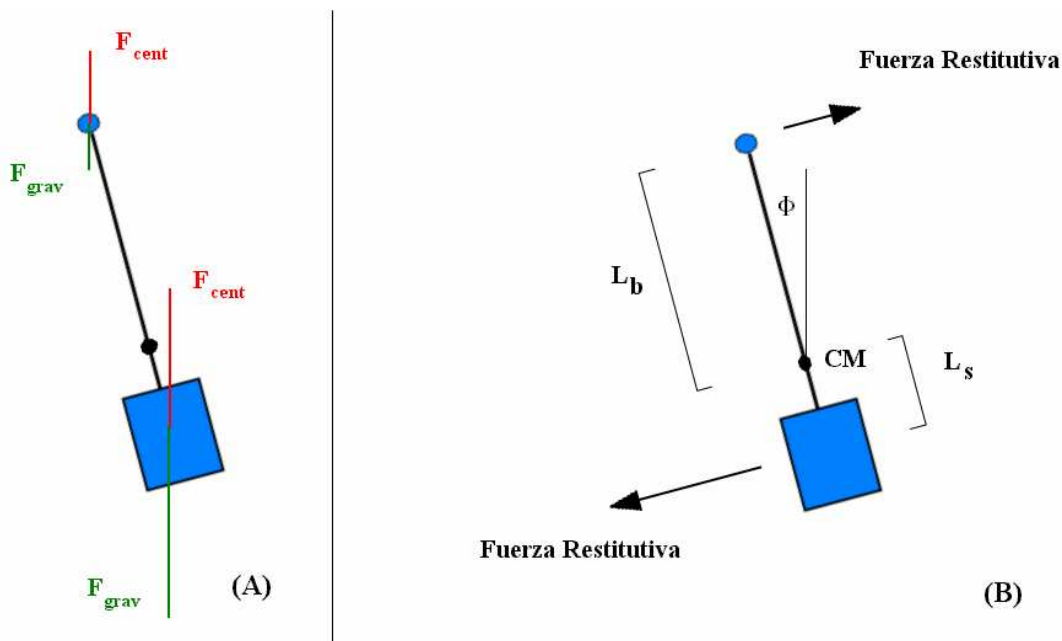


Figura 2: (A) fuerzas gravitatoria y centrífuga actuando sobre las masas del satélite y el boom, (B) proyección de las fuerzas actuantes sobre ambas masas que dan lugar a las fuerzas restitutivas sobre el conjunto satélite-boom.

Para desplegar el boom, es necesario conocer la posición del satélite con respecto a la vertical de la Tierra (eje nadir), para ello se deberán utilizar ciertos sensores y otros dispositivos en el satélite que relevaran información sobre la posición relativa del satélite con ciertos cuerpos celestiales como el Sol, la Luna, o la Tierra. Estos sensores estarán conectados a la computadora de a bordo para tomar la decisión de desplegar o no el boom.

El boom debe desplegarse lo más vertical posible, de manera que pueda actuar el gradiente de gravedad sobre ambas masas satélite-boom (ver figura 2).

Si se desplegara en la dirección del rumbo orbital, el sistema estaría horizontal y no habría ninguna diferencia entre la fuerza de gravedad que actúa en el satélite y en el boom.

Es crucial para que la masa sea desplegada, que esta esté en el mismo plano vertical como el satélite, pero en una órbita más alta. Esto permitiría a la fuerza de gravedad ser más fuerte en la masa del satélite y estabilizaría el conjunto.

Una vez que la masa se despliega, el sistema entero tendrá tendencias similares a un péndulo. Esto es debido a la vibración y fuerzas atmosféricas, y la masa del boom precisamente no estará alineándose con el satélite y el campo gravitatorio de la Tierra.

En un péndulo la masa del extremo, una vez que deja de girar, la fuerza de gravedad la alinea al centro de masa con el campo gravitatorio de la Tierra.

La estabilidad o tolerancia del sistema una vez que está en un equilibrio relativo, también debe ser evaluado. El sistema nunca será totalmente amortiguado, oscilará, debido a perturbaciones encontradas en el espacio. Esta será una parte crucial en el estudio, porque el boom necesita desarrollar un torque por sobre todos los torques combinados del medioambiente espacial. Cuando esto se logra, la estabilización del cuerpo del satélite estará al máximo.

Los satélites pequeños cumplen diferentes funciones, que van desde las comunicaciones, observación, o misiones de investigación científicas. Es vital para ellos superar cualquier perturbación que pueda comprometer su misión. Semejantes perturbaciones como las mencionadas previamente, se transforman en oscilaciones debido al momento angular del satélite. Esta oscilación puede sacarlo fuera de la tolerancia de estabilización, para nuestro

caso lograr un ± 5 grados a lo largo del vector del nadir que apunta hacia tierra, será suficiente.

2.- SATELITES CON BOOM

Antes de comenzar el pre-diseño del boom para el PehuenSat-2, recurrimos a obtener datos de otros satélites que han utilizado este sistema de control pasivo de actitud.

Para ello analizamos 10 pequeños satélites (tabla 1), en donde tabulamos la masa total del satélite, la masa del boom, y el largo del boom.

Nombre	Masa tot (Kg)	Masa Boom (kg)	Distancia Boom
Asusat-1	4,5	0,05	2
QuakeSat	5	0,45	0,7
cubo	40	7	4
FalconSAT-3	46,1	8	3,38
ONYX	30	3	3
Oersted	60	1,6	8
PuTemp	68	4	4
Badr-B	70	4	6
SattipoSurrey	70	3	5
sat1	100	10	6

Tabla 1: datos básicos de diez pequeños satélites que han utilizado boom.

Con los 10 ejemplos realizamos varias combinaciones entre las masas, el largo del boom, y los momentos en juego, y hallamos en algunas de estas relaciones coeficientes de correlación bajos indicando la gran dispersión de datos. Por lo que se decidió separarlos en dos grupos: uno incluiría a los satélites hasta 50 Kg de masa, y el segundo grupo a los mayores de este valor. Los gráficos 1 y 2 muestran estos resultados.

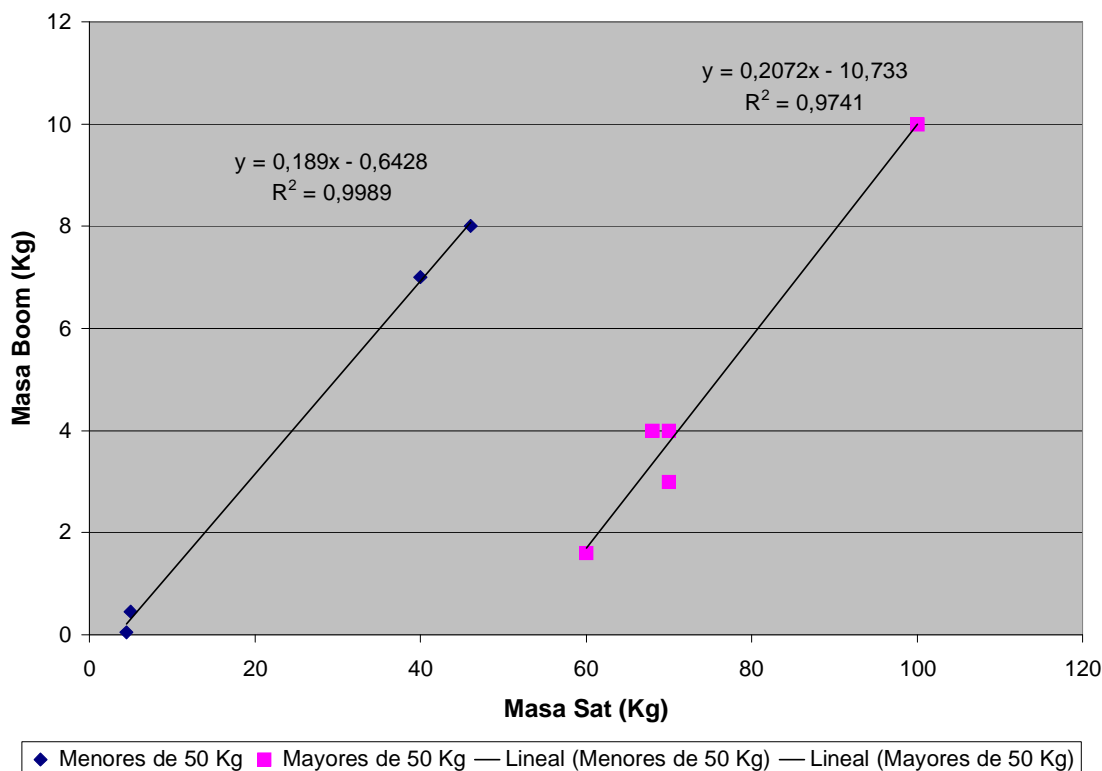


Gráfico 1: Masa del Boom en función de la masa total del satélite.

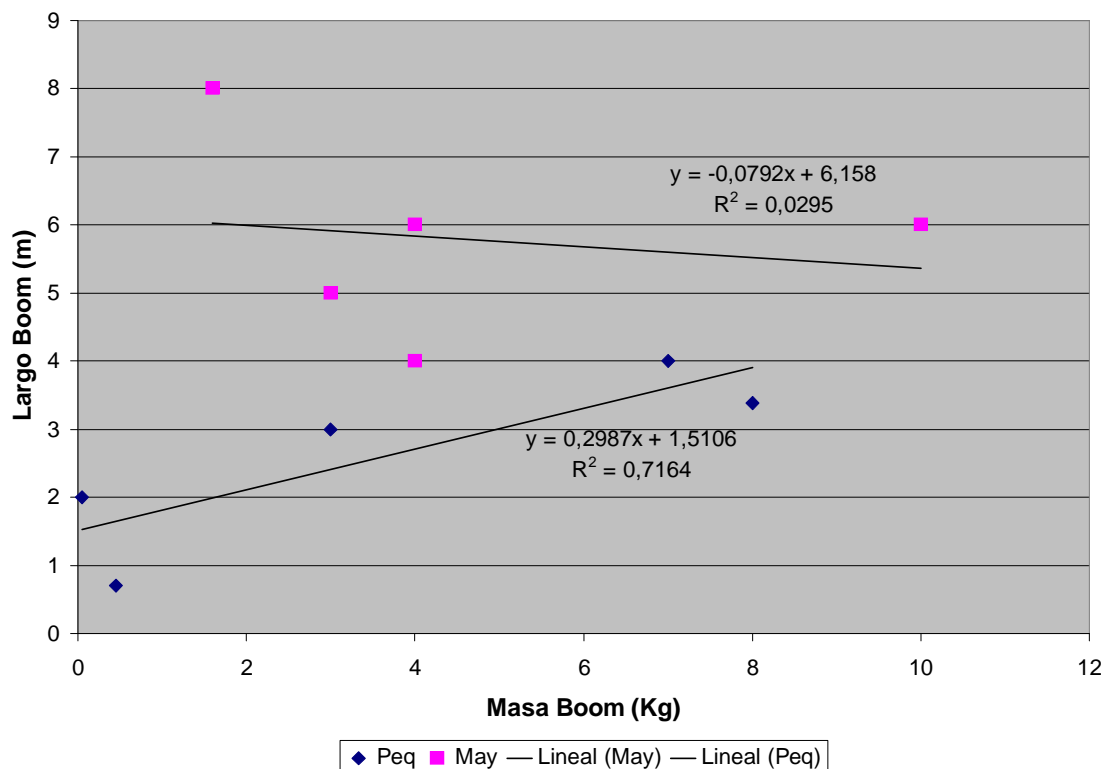


Gráfico 2: Largo del Boom en función de su masa.

En ambos gráficos se trazaron las curvas de regresión lineal y se determinaron la ecuación que la representa, como su coeficiente de correlación, el cual en el caso del gráfico 1 (relación entre las masas del satélite y boom) es casi perfecta 0,9989. Para la relación masa con largo del boom ha dado 0,7164 bastante aceptable.

3.- APLICACIÓN AL PEHUENSAT-2

El PehuenSat-2 tomará la experiencia de su antecesor el PehuenSat-1 (Lassig et all, 2007), por lo que estará constituido por dos módulos del mismo, tendrá una masa total de 12 Kg, de forma prismática rectangular, con dimensiones (x,y,z) de 0,21 x 0,24 x 0,30 metros (Quiroga et all, 2009).

Con el dato de su masa (12 Kg) utilizamos el gráfico 1 y obtenemos que la masa del boom deberá ser del orden de los 2 Kg.

Con este valor se ingresa al grafico 2 y obtenemos que el largo del boom debe ser de unos dos metros.

A continuación se cargaron todos los datos dimensionales y de distribución de masas en el programa Solidworks, obteniéndose los momentos de inercia con el boom dentro del satélite y luego desplegado del mismo. Momentos de Inercia del Satélite con el Boom extendido:

$$I_{xx} = 10,0358 \text{ (Kg m}^2\text{)}$$

$$I_{yy} = 10,0400 \text{ (Kg m}^2\text{)}$$

$$I_{zz} = 0,0959 \text{ (Kg m}^2\text{)}$$

Para determinar si esta configuración geométrica es estable, determinamos los coeficientes K_x y K_z en función de los momentos de inercia principales:

$$K_x = (I_y - I_z) / I_x \quad (4)$$

$$K_z = (I_y - I_x) / I_z \quad (5)$$

Dando como resultado:

$$K_x = 0,9908$$

$$K_z = 0,0427$$

Luego ingresando en el diagrama de estabilidad según la figura 5 (Hughes, 1986) obtenemos que la configuración geométrica es estable.

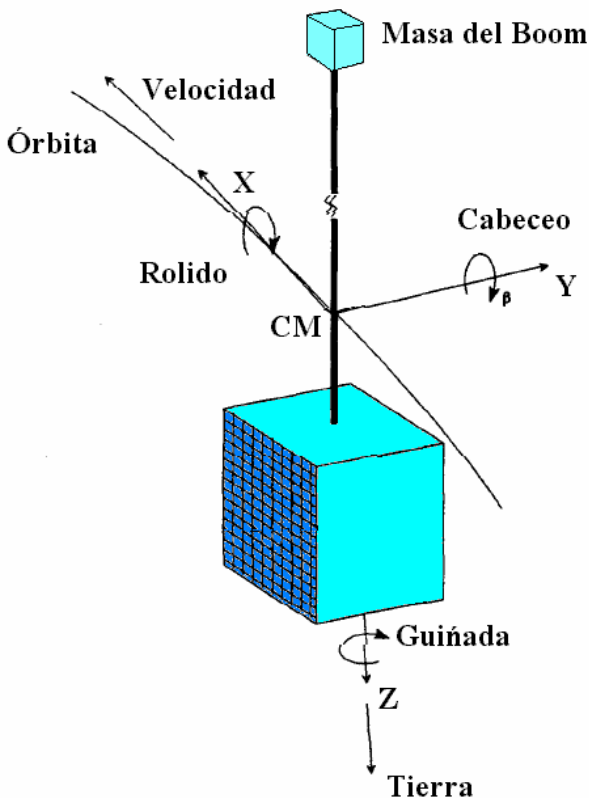


Figura 3: Sistema de referencia del satélite.

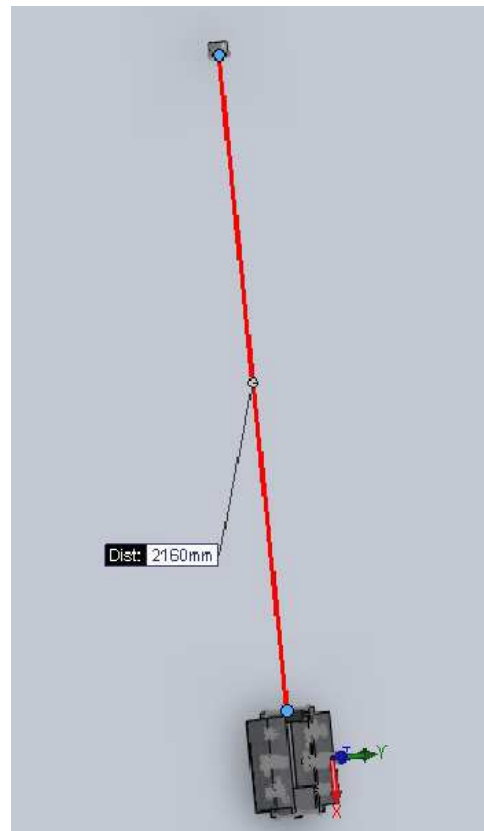


Figura 4: PehuenSat-2 con su Boom extendido.

4.- PERTURBACIONES

Las perturbaciones típicas que encontrará el satélite en la una órbita LEO serán debido a la presión solar, el arrastre aerodinámico, torques magnéticos debido a las variaciones del campo magnético terrestre y torques debido a las variaciones del gradiente de gravedad del planeta.

4.1.- Radiación Solar

Esta actúa sobre toda la superficie del satélite y produce un efecto de acción-reacción dependiendo de cuanto refleje o absorba este tipo de radiación los materiales superficiales de la nave espacial. Así la expresión del torque debido a la radiación solar se puede expresar como:

$$\mathbf{T}_{\text{solar}} = \mathbf{P}_{\text{solar}} \cdot \mathbf{C}_r \cdot \mathbf{A}_s \cdot (\mathbf{c}_p - \mathbf{c}_g) \quad (6)$$

Donde P_{solar} es la presión solar ($4,51 \times 10^{-6} \text{ N.m}^2$), C_r es el coeficiente de reflectividad (podemos asumir para nuestro satélite 1,6), A_s es el área del satélite expuesta a la radiación solar, C_p el centro de presión del viento solar ejercido sobre el satélite, y c_g el centro de gravedad del satélite.

Aplicado al PehuenSat-2, el torque de esta perturbación lo podemos cuantificar en:

$$\mathbf{T}_{\text{solar}} = 2,59 \cdot 10^{-8} \text{ N.m} \quad (7)$$

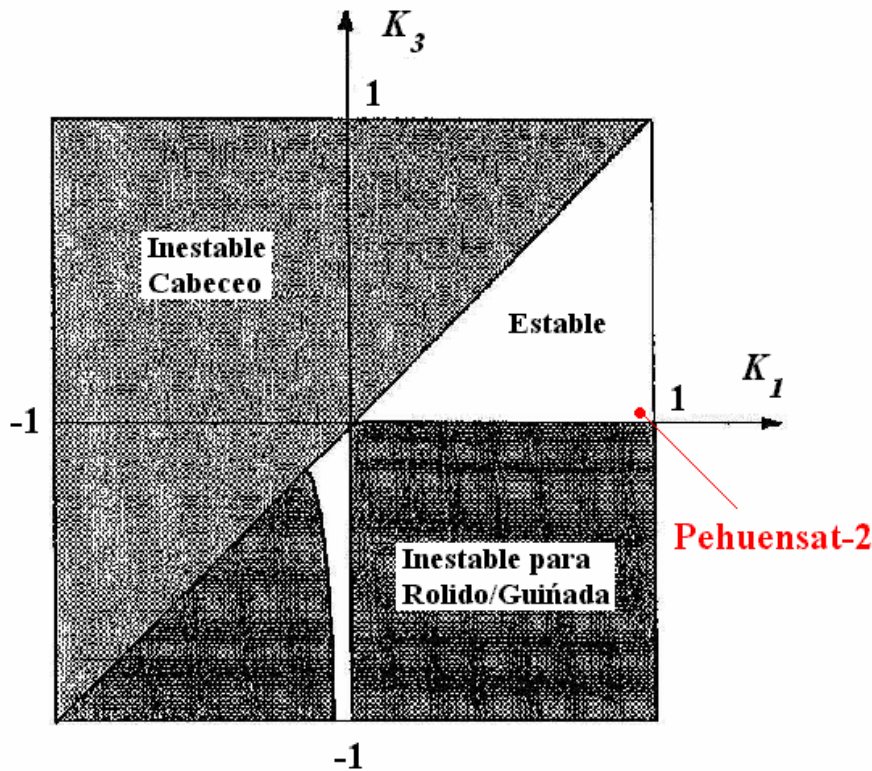


Figura 5: Diagrama de regiones estables por gradiente de gravedad para satélites de órbita circular baja.

4.2.- Torque por Gradiente de Gravedad

Para el peor de los casos el torque debido a este tipo de perturbación se puede expresar como:

$$\mathbf{T}_g = \frac{3 \cdot \mu}{2 \cdot R_0^3} (\mathbf{I}_z - \mathbf{I}_x) \cdot \text{sen } 2\theta \quad (8)$$

Donde μ vale $3,986 \times 10^{14} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$, R_0 el radio terrestre ($6,986 \times 10^6 \text{ m}$), para $\theta = 15^\circ$, quedaría unos:

$$\mathbf{T}_{gg} = 8,64 \times 10^{-6} \text{ N.m} \quad (9)$$

4.3.- Torque Aerodinámico

El torque aerodinámico se expresa como:

$$T_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_D \cdot A \cdot (C_{pa} - C_{cg}) \quad (10)$$

Con: $C_D = 2,2$ $\rho = 2,8 \times 10^{-13} \text{ Kg.m}^{-3}$ $V = 7,5 \times 10^3 \text{ m.s}^{-1}$ $C_{pa} = 0,05$ $A = 0,072 \text{ m}^2$
 Da como magnitud:

$$T_A = 6,23 \times 10^{-8} \text{ N.m}$$

4.4.- Perturbación Magnética

Hay también perturbaciones internas debido a los circuitos eléctricos del satélite que interactúan con el campo magnético terrestre, según Busterud (2003), a esta perturbación la podemos valorar en:

$$T_{\text{magn}} = 1 \times 10^{-6} \text{ N.m}$$

4.5.- Torque Restitutivo

El momento restitutivo para un ángulo θ de 15° es de:

$$\text{Momento Restitutivo del Boom} = 9,23 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

Que es mucho mayor que la suma de todas las perturbaciones.

5.- CONCLUSIONES

Se han obtenido dos gráficos muy prácticos para realizar el pre-diseño de un boom como estabilizador pasivo de actitud de pequeños satélites.

Al aplicarlo al PehuenSat-2, arrojo un torque restitutivo adecuado ante las perturbaciones naturales del medio ambiente espacial.

El paso siguiente, será el diseño definitivo en base a estos datos preliminares, y determinar el sistema de extensión del Boom.

6.- REFERENCIAS

- Busterud, B. E. *Orienteringsregulering av mikrosatellitter*. Master thesis, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, Noruega, NTNU 2003.
- Hughes, Peter C. *Spacecraft Attitude Dynamics*. In pp.297. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1986.
- Kershner, Richard. Gravity-gradient stabilization of satellites. *Astronautics and Aerospace Engineering*; Vol 1, N° 8, pp.18-22, 1963.
- Lassig,J., Quiroga,J., Simone,D, Keil,G. y Jurasics,A.- Pehuensat-1: Final Report ; 58th *International CongressIAF, Hyderabad, India , from 24 to 28 September 2007*.
- Lorenzini,E., Cosmo,M., Vetrella,. And Moccia,A. Dynamics and control of the tether elevador/crawler system. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol 12 N°3, pp 404-411, 1989.
- Oehrig,J., Schea,J., Bennett,A., Schutt,N., Lee,J., Holmes,W., Prentice,D., Platt,A., Voss,D., Voss,J., Dailey,J. and H.D.Voss. TU Sat 1—An Innovative Low-Cost Communications Satellite; *Paper published for 15th annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*; 13-16 August 2001, Logan, Utah
- Quiroga,J., Lassig,J., Simone,D. y Jurasics,A. PehuenSat-2. *V Congreso Argentino de Tecnología Espacial . Mayo de 2009, Mar del Plata. Buenos Aires – Argentina*.