

Control de posición de un globo aerostático utilizando sistema INS/GPS

Jaime Torres y Marcelo Pozo
Ingeniería en Electrónica y Control
jaimedtorres@hotmail.com

Resumen

El Proyecto Plataforma de Gran Altitud tiene por objetivo en su Área de Control Automático el desarrollo de una aeronave no tripulada con capacidad de vuelo autónomo, cumpliendo así una misión previamente planificada, con la opción de cambiar su comportamiento de acuerdo a las necesidades de la estación de monitoreo y control en tierra. El presente documento describirá la dinámica de vuelo del dirigible así como su estrategia de control.

1 Descripción de la planta

El Prototipo 9T del Proyecto PGA es un dirigible de 9 m de longitud que utiliza el gas helio para su sustentación aerostática. Como parte del sistema de control de vuelo se emplean:

Para propulsión, dos motores eléctricos unidos por un eje móvil situado en la góndola. Estos adicionalmente ayudan al movimiento de *pitch*¹ para ascenso/descenso.

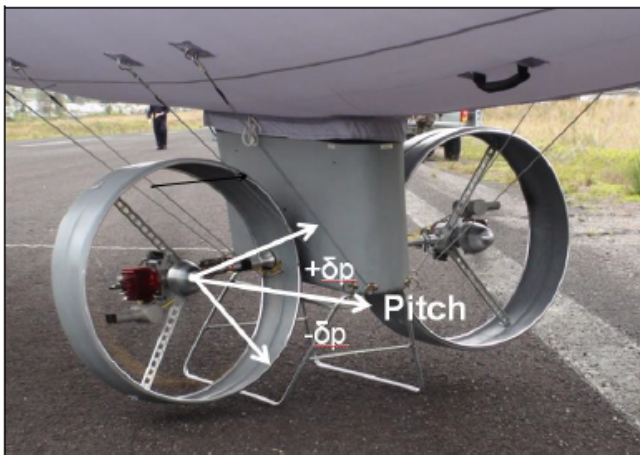


Figura 1. Góndola y motores.

Como *planos de vuelo*², cuatro superficies móviles situadas alrededor de la cola de la aeronave.

¹Cabeceo.

²Estructuras aerodinámicas cuya presencia o deflexión actúa sobre el globo permitiendo su control.

³Movimientos de rotación alrededor de cada eje y la traslación de los mismo.

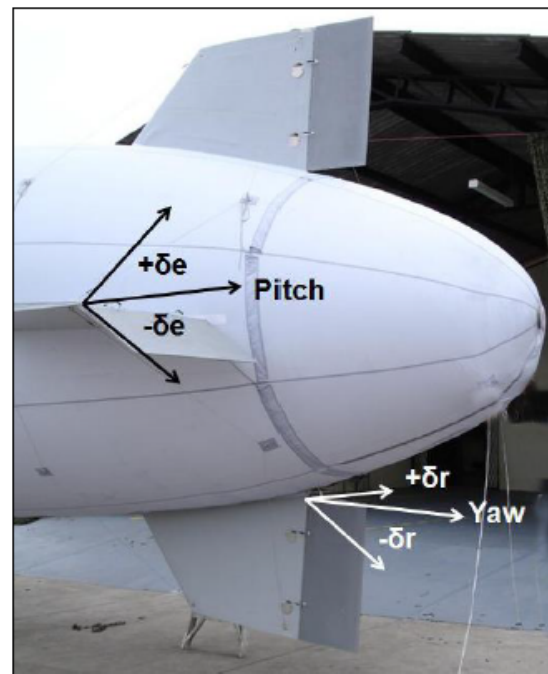


Figura 2. Planos de vuelo del dirigible.

El dirigible posee 6 *grados de libertad*³, correspondientes a los ejes x, y, z , y cuyo origen está fijado en el centro de gravedad (CG), el cual puede variar de acuerdo a los cambios de distribución peso. Para los cálculos de modelamiento matemático se ha considerado que el centro de volumen (CV) coincide con CG del dirigible $(0, 0, 0)$.

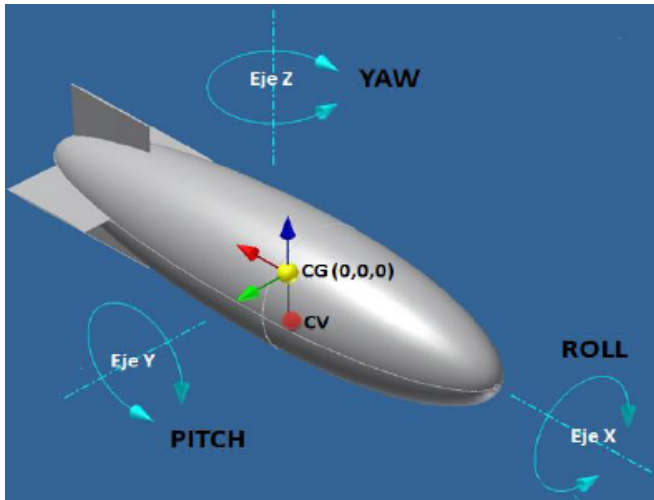


Figura 3. Grados de libertad de la aeronave.

2 Descripción de una operación de vuelo

Al momento para los prototipos el escenario de las misiones se enmarca en una altura de entre 20 a 1200 metros sobre el punto de despegue. En cuanto a velocidad, esta es no mayor a los 30 km/h. El tiempo de vuelo en cada prueba no sobrepasa los 45 minutos debido a las limitaciones de energía de las baterías *LiPo*⁴, utilizadas como suministro del sistema de control y motores.

Podemos diferenciar claramente tres fases de vuelo:

2.1 Fase de despegue



Figura 4. Chequeo de pre-vuelo.

Para la maniobra de despegue los actuadores implicados son dos motores eléctricos propulsores junto con la intervención de los planos de vuelo (elevadores) con un movimiento simétrico con la bancada⁵ de 30 grados.

⁴Polímero de Litio

⁵Sistema de servomotores que actúan de manera combinada y coordinada para rotar el eje en el que están montados los motores, cambiando la dirección del vector de empuje

⁶También conocido como carga útil, es el equipo adicional, fuera de lo necesario para el control de la nave, que permite cumplir con una misión, por ejemplo cámaras y equipos de comunicaciones.

Una vez alcanzada la altura de referencia, los motores se apagan y el dirigible se sustenta por aerostática en una determinada posición manteniendo una posición determinada en un volumen de tolerancia; los motores se encenderán si el globo sale de la posición especificada y regresara a la posición original. Para navegación los motores de propulsión toman la velocidad de desplazamiento prefijada.

2.2 Fase de navegación

Aquí, el dirigible se direcciona hacia los puntos establecidos en el plan de vuelo o waypoints, los cuales marcan la trayectoria a seguir. Principalmente mientras la nave transita entre los puntos, trata de mantener su altura y velocidad dentro de lo deseado (trayectoria de tolerancia), además, de requerirse, realiza el control automático del *payload*⁶.



Figura 5. Etapa de navegación.

2.3 Fase de aterrizaje

El momento del aterrizaje, la aeronave se encamina hacia el punto de despegue u origen, perdiendo altura paulatinamente.



Figura 6. Etapa de Aterrizaje.

Finalmente cabe destacar que en caso de emergencia el sistema es capaz de tomar una acción correctiva de acuerdo al problema suscitado. Por ejemplo, de perderse el enlace de radio comunicaciones por un tiempo determinado, la aeronave automáticamente regresará, intentando así recuperar la señal.

3 Sistema de lazo cerrado para control

Un sistema de lazo cerrado puede ser descrito como un medio para controlar la salida de un proceso mediante la comparación de un parámetro requerido o de referencia con la salida del proceso, utilizando el resultado de esta comparación para generar acciones de control que puedan cambiar la señal de salida.

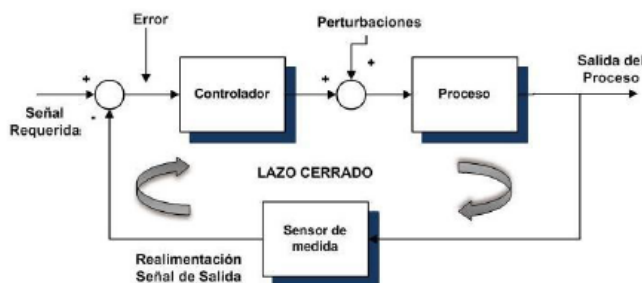


Figura 7. Ejemplo de lazo cerrado.

En el diagrama de la Figura 7 se compara la señal requerida con la señal de la realimentación de la salida del proceso, dicha comparación genera un error. A este sistema también se suman señales no deseadas o perturbaciones, que representan los cambios físicos externos ajenos al proceso.

Se debe considerar que la señal de error puede ser muy pequeña por lo cual es necesaria una etapa de ganancia antes del controlador, en caso de no existir esta etapa el controlador debería ser muy "sensible", es decir pequeños errores deben ser capaces de generar una respuesta significativa con la finalidad de que la señal de salida se iguale con la requerida, reduciendo el error (idealmente sea igual a cero). En sistemas de lazo cerrado existen tiempos de retraso en las señales razón entre la señal de referencia y la señal de control, por la cual el sistema se puede volver "inestable".

Por tal razón es necesario tomar en cuenta la regla de estabilidad del sistema: en un lazo cerrado (con realimentación negativa), cuando el retraso de fase alrededor de la malla es de 180 grados (1/2 ciclo), la ganancia de alrededor de la malla debe ser inferior a 1,0 para que el sistema sea estable tal como se muestra en la Figura 8.

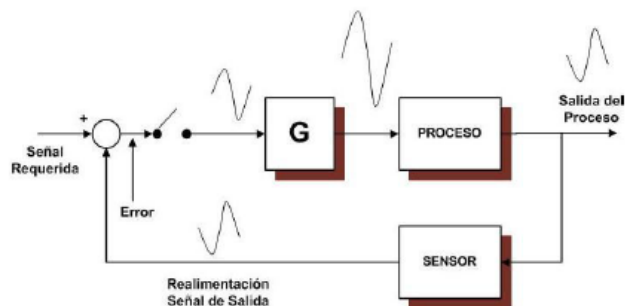


Figura 8. Ilustración del concepto de estabilidad.

4 Identificación de las variables y parámetros

El modelo matemático de un sistema dinámico puede ser planteado a partir de su respuesta ante factores físicos como por el movimiento de los actuadores y planos de vuelo en cada una de las fases de vuelo, las mismas que deben ser planteadas en forma de un modelo matemático. La identificación es una aproximación experimental para la determinación del modelo dinámico del dirigible. Se requiere:

- Adquisición de entradas y salidas
- Determinación de un modelo básico o de menor complejidad de la planta.
- Estimación de los parámetros del modelo.
- Validación del modelo identificado.

5 Arquitectura del sistema de piloto automático

En la Figura 9 se detalla gráficamente la arquitectura básica del sistema.

5.1 Tarjeta principal

La tarjeta principal del piloto automático gracias a sus sensores de actitud (giroscopios, acelerómetros, *compás*⁷) y de posición dinámica (GPS, sensores de presión, sensor *AGL*⁸), trata de mantener la nave bajo lo programado en el plan de vuelo y en los lazos de realimentación, sea esto cumplir un patrón específico de vuelo por diferentes puntos, aterrizar solo, manejo de carga útil o acciones de emergencia.

⁷Brújula electrónica

⁸Above Ground Level Sensor o sensor de nivel sobre el suelo.

5.2 Radio módem

El *radio módem*⁹ es una parte fundamental, ya que es este equipo quien se encarga de realizar la comunicación entre el software de la *estación base*¹⁰ y la tarjeta principal del piloto automático cuando este se encuentra en pleno vuelo. En tierra esta comunicación se puede realizar mediante un cable adaptador al computador. Ambas comunicaciones se realizan bajo el estándar *RS-232*¹¹.

5.3 Radio receptor

Capta la señal del radio control de la aeronave. El receptor es muy necesario, teniendo en cuenta que el radio control es el sistema principal de control manual. Adicionalmente las señales del radio receptor son necesarias para ciertas acciones de seguridad del piloto automático,

este detecta su presencia o ausencia y actúa acorde; esto fue diseñado debido a lo imperativo del control manual mediante radio.

5.4 Servo Mux

Finalmente tenemos la parte del manejo de los actuadores de la planta. Los servomotores son utilizados de manera muy amplia en aplicaciones de vehículos aéreos no tripulados (UAV) y vehículos aéreos radio controlados (RPV) debido a sus grandes prestaciones como poco peso, bajo consumo de energía, relativo buen torque y controlabilidad. Estos motores se manejan mediante señal *PWM*¹² entre 50 y 72 Hz¹³ mediante una placa que multiplexa las señales por canales para los diferentes actuadores.

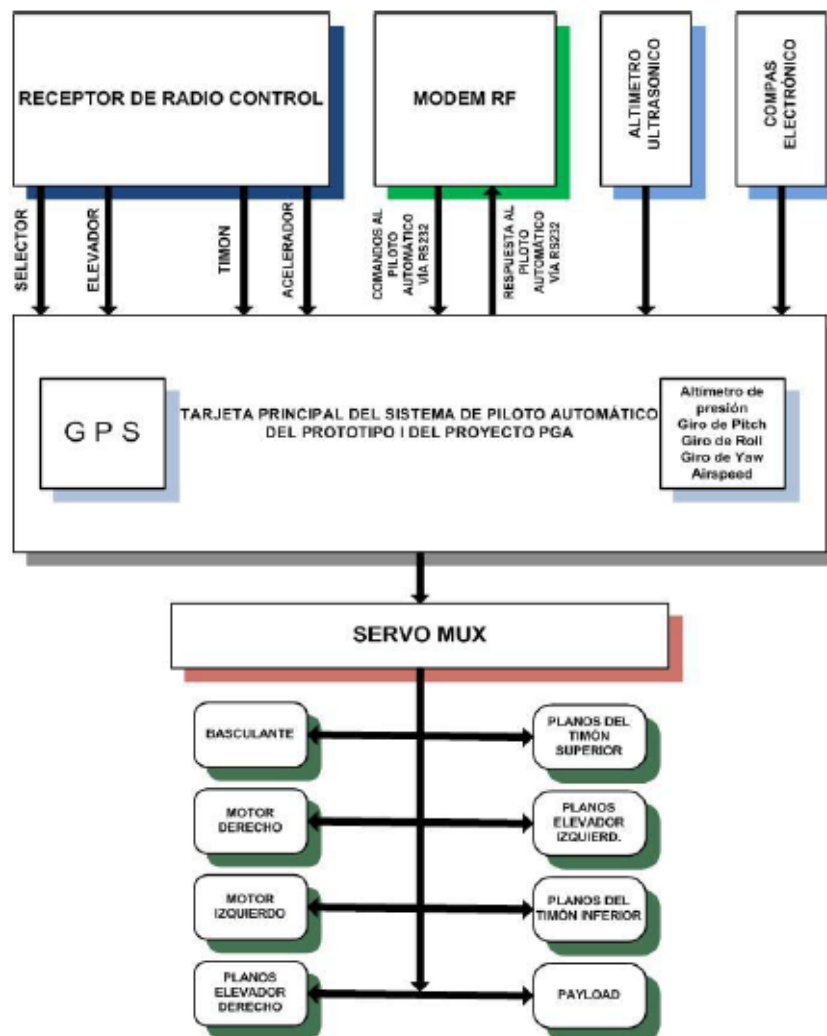


Figura 9. Diagrama de bloques de la arquitectura del sistema de piloto automático.

⁹RF módem.

¹⁰Es un computador dedicado que posee una interfaz gráfica para el monitoreo y control de la aeronave.

¹¹Recommended Standard 232, una interfaz de comunicaciones tipo serie para intercambio de datos binarios.

¹²Pulse width modulation, modulación por ancho de pulso.

¹³Hertz, hercios, ciclos por segundo.

6 Estrategia de control en base a controladores PID

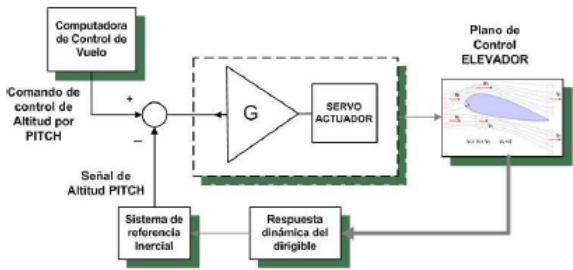


Figura 10. Diagrama de bloques simplificado del lazo de control de altura mediante pitch.

Los parámetros de diseño y desempeño del sistema se relacionan en un modelo matemático representado por un polinomio que debe ser igualado al polinomio de lazo cerrado, esta igualación da como resultado los valores de los coeficientes de los reguladores.

Para elegir la estrategia de control se deben tomar en cuenta las condiciones de vuelo planteadas, teniendo como objetivo mantener el *blimp*¹⁴ a una velocidad constante de desplazamiento, a una altitud fija y cumpliendo la ruta de vuelo, todo con algoritmos que no requieran gran cantidad de tiempo de procesamiento para su ejecución.

De lo anteriormente mencionado podemos decir que la estrategia de control se basa en:

- Control PIDs clásicos.
- Control predictivo (GPCs Generalized Predictive Control).
- Controles no lineales (FOC, First Order Control).

El sistema del piloto automático basa su toma de decisiones en lazos de control PID, los mismos que según el proceso pueden ser lazos de primer, segundo o tercer orden.

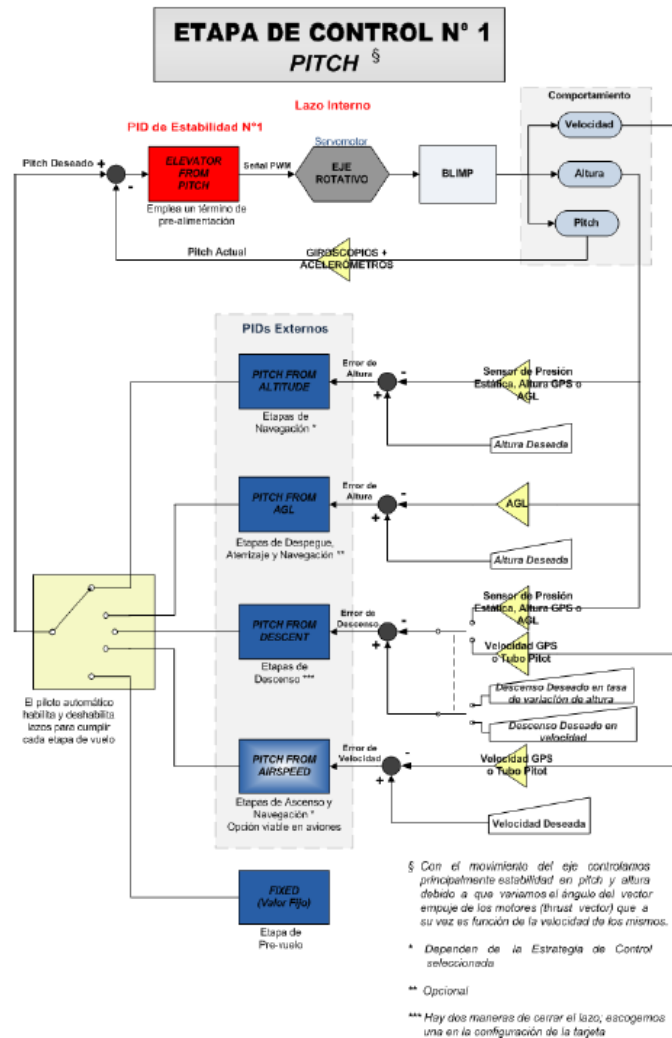


Figura 11. Diagrama de bloques para ejemplificar parte de la estrategia de control.

¹⁴Sinónimo de dirigible.

En la Figura 11 se describe a manera de ejemplo simplificado, un esquema de los lazos PID para control de pitch:

Cada uno de los bloques de color azul y el de color rojo representan un controlador PID (algunos de ellos con términos de pre-alimentación). Como se puede apreciar, tenemos un sistema con selector de multilazos. Esta selección la realiza el piloto automático con el fin de emplear la mejor respuesta dependiendo de la etapa de vuelo, por ejemplo si la aeronave sobrepasa la altura deseada durante la navegación, el piloto automático activará el lazo que permite un desempeño óptimo para el descenso.

7 Pruebas de la respuesta de los sistemas de control

El comportamiento dinámico de un sistema de lazo cerrado se puede expresar en términos de ciertos atributos de la respuesta del sistema para estímulos exteriores. Tales atributos incluyen la capacidad para responder rápidamente a los cambios en la señal de entrada frente a una reacción más dócil a estos cambios. La rapidez en la respuesta por lo general tiene un precio, típicamente, un sistema de control muy sensible puede presentar un comportamiento oscilatorio o inestable.

En algunas aplicaciones con un proceso relativamente más lento, una respuesta lenta, con un comportamiento oscilatorio puede ser el objetivo que se busca, pero en la mayor parte de los procesos, la respuesta a un cambio en la señal de entrada que resulta en una salida que transitoriamente rebasa un valor deseado puede ser totalmente inaceptable, por ejemplo en los sistemas de las aeronaves una pérdida de tiempo puede reflejarse en la pérdida de la planta y por tanto inestabilidad.

Con el fin de determinar el comportamiento cualitativo de un proceso se deben establecer procedimientos para obtener las características dinámicas en forma numérica, utilizando métodos analíticos o experimentales. Ambos enfoques son necesarios para poder confrontar la teoría con la práctica y de esta manera validando los datos calculados.

El término utilizado para describir el comportamiento dinámico de un sistema de lazo cerrado se lo llama "respuesta característica", y puede ser determinada como:

- Una respuesta transitoria, es decir la reacción del sistema a un cambio repentino de la señal de entrada del sistema, o
- Una respuesta de estado estacionario, es decir cuando se somete al sistema al cambio de la señal de entrada por un tiempo continuo.

8 Conclusiones y recomendaciones

1. El Control de Posición tanto en estado estático (posición fija-volumen de tolerancia) como en estado

dinámico (trayectoria de vuelo-ruta con margen de tolerancia) no es un proceso sencillo, sino mas tiene su complejidad que gracias a los sistemas digitales modernos se los puede comandar utilizando técnicas inteligentes de control.

2. Para el control del proceso en sí, se necesita identificar las variables a controlar, para lo cual se debe realizar experimentos con y sin perturbación, y concluir posteriormente las variables que más influyen en el proceso, por ejemplo altura, presión, temperatura, etc.
3. Hay que diferenciar lo que es un control de posición de un dirigible (que es el presente trabajo) y el control de posición de un aeroplano; en el primero, el dirigible, el control es mediante procesos aerostáticos, sin necesidad de ángulos de elevación "pitch" ni de giro "roll" en el ascenso y descenso, sino mas bien por diferencia de pesos específicos entre el dirigible y el aire externo (proceso similar al de flotabilidad de cuerpos en el agua); en cambio el proceso de de un aeroplano es diferente ya que el mismo aeroplano debe generar un flujo de aire en sus alas, y por medio de ello elevarse o descender con ángulos pitch y roll.
4. Como el proceso del dirigible es aerostático el consumo de energía solo es necesario en el ascenso y descenso, y en una ruta de vuelo de ser el caso; en el momento que llega a una determinada posición, se mantiene por flotabilidad y los motores solo se encenderán si el dirigible sale de un volumen de tolerancia
5. Para el control obligatoriamente se necesita realizar en lazo cerrado, para lo cual se necesita realimentación de señales a partir del sensamiento de variables por medio de giroscopios, acelerómetros, compás, entre otros, señales que son acondicionadas y luego tratadas dentro de sistemas computacionales a fin de mantener y controlar la posición y trayectoria deseada
6. La Arquitectura del sistema de Piloto Automático es un sistema digital computarizado muy complejo, pero muy importante por la variedad de señales que se debe controlar.
7. Hasta el momento se describe la operatividad del dirigible por medio de un Sistema Piloto Automático comercial, las siguientes fases consistirán en mejorar aun mas las técnicas y el control utilizando el mismo Piloto Automático, y en paralelo desarrollar hardware y software equivalente al comercial, de tal manera de no depender de licencias ni fabricantes, y además desarrollar tecnología nacional.

Referencias

- [1] Bento Alexandra. *Modeling and Nonlinear Control for Airship Autonomous Flight*. Tesis Doctoral en Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica de Lisboa. Diciembre 2007.
- [2] De Paiva E., Bueno S., Varella Gomes S., Bergerman M. y Ramos J. A. *Control System Development Environment for AURORA's Semi-Autonomous Robotic Airship*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Mi. (USA), May, 1999.
- [3] Diaz H., Solaque L. y Gauthier A. *Fuzzy identification and parallel distributed compensation for cruise flight phase of a blimp*, V Congreso Internacional Electrónica y Tecnologías de Avanzada - CIETA, Pamplona (Colombia), September, 2006.
- [4] Mueller Joseph, Paluszek Michael. *Development of an Aerodynamic Model and Control Law Design for a High Altitude Airship*. Princeton Satellite Systems, Princeton 2004. University of Minnesota, Minneapolis 2004.
- [5] Faria Bruno. *Identificação Dinâmica Longitudinal de um Dirigível Robótico Autônomo*. Tesis de Masterado en Ingeniería Eléctrica, Unicamp. Febrero 2005.
- [6] Langton Roy. *Stability and Control of Aircraft Systems*. John Wiley & Sons. England. 2006