

Diseño y construcción de un prototipo de sistema de control de gases para ballonets en un dirigible

Hugo Loya y Patricio Burbano
Ingeniería en Electrónica y Control
giomh_1107@hotmail.com

Resumen

El Proyecto Plataforma de Gran Altitud (PGA) dentro de su Área de Control Automático ha requerido el desarrollo de un prototipo de sistema de control de gases para los ballonets que se encuentran en el interior de un dirigible. Este sistema complementará y permitirá tener un mejor control en lo que se refiere al manejo de la nave, manteniendo la presión interna y por lo tanto la forma aerodinámica del envoltente¹ y a la vez que permitirá tener un control en el ascenso y descenso, manipulando el peso del dirigible mediante la introducción y extracción de aire del ballonet. Su funcionamiento es controlado manual y automáticamente y monitoreado continuamente desde la estación base ubicada en tierra.

El presente documento describe el funcionamiento del sistema así como también la estrategia de control empleada y el diseño de los componentes utilizados.

1 Dirigibles

Se conoce como dirigible a un aerostato autopropulsado que posee la capacidad de maniobra, para ser gobernado como una aeronave. La sustentación aerostática se logra mediante depósitos llenos de un gas de menor densidad como por ejemplo Helio o Hidrógeno que difieren del gas de la atmósfera circundante, en este caso aire.

El principio físico de un dirigible se basa en el Principio de Arquímedes, el cual manifiesta que todo cuerpo sumergido en un fluido recibe una fuerza de abajo hacia arriba equivalente al peso del fluido desplazado. El dirigible, un cuerpo inmerso en la mezcla de gases llamada aire.

2 Sistema de administración de gases

El sistema de administración de gases en un dirigible cumple 2 funciones principales:

- Control de ascenso y descenso.
- Control de presión interna del dirigible.

Para este propósito se emplearán los llamados ballonets, los cuales se encuentran en el interior del dirigible como se ve en la Figura 1 y cuya manipulación permite cumplir las 2 funciones antes mencionadas.



Figura 1. Dirigible de 9 metros y en su interior un ballonet.

3 Submarinos

Un submarino es un tipo especial de buque capaz de navegar bajo el agua además de la superficie, gracias a un sistema de flotabilidad variable².

Todos los barcos, así como los submarinos en superficie, están en situación de flotación positiva, pesando menos que el volumen equivalente de agua desplazada (de acuerdo con el principio de Arquímedes). Para sumergirse hidrostáticamente (sin ayuda mecánica), un buque debe ganar flotación neutral (peso igual a empuje), bien

¹Estructura que da la forma al dirigible.

²Capacidad de un cuerpo para modificar su flotación dentro del fluido.

incrementando su propio peso o disminuyendo el desplazamiento de agua (volumen). Para controlar su peso, los submarinos están equipados con tanques de lastre, que pueden llenarse con agua tomada del exterior o aire a presión.

Al momento de sumergirse o emerger, los submarinos usan los tanques de proa y popa, llamados tanques principales, que se abren y se llenan completamente de agua para sumergirse o se llenan de aire a presión para emerger.

4 Analogía dirigible-submarino

Un dirigible o un submarino requiere de un sistema que les permita ganar o perder peso de acuerdo a su necesidad, para el caso del submarino tiene como lastre el agua, introduciéndola hacia sus compartimentos para ganar peso y mediante la introducción de aire a presión y extracción de agua para perder peso, en cambio en un dirigible se tiene como lastre el aire de la atmósfera, el cual será utilizado de la misma manera que el lastre de un submarino.

Para este propósito los ballonets habrán de llenarse de aire para ganar peso y vaciarse para perder peso, consiguiendo el mismo efecto que un submarino. Además el control de ballonets permite mantener la presión interna del dirigible casi constante ya que esto es imprescindible en un dirigible no rígido para no perder su forma aerodinámica.

En la Figura 2 se puede ver la analogía entre los compartimientos de un dirigible y de un submarino.

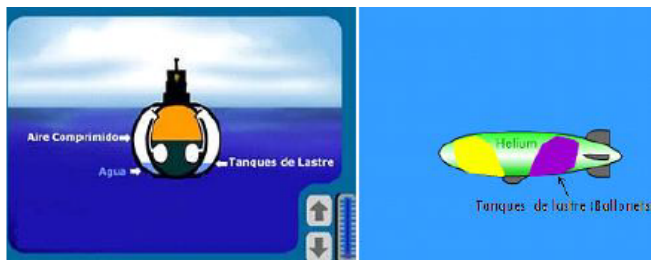


Figura 2. Analogía entre los tanques de lastre de un submarino y un dirigible.

4.1 Ballonet

Es un compartimiento construido del mismo material que el envoltorio el cual llevara el lastre y en su exterior se encuentra ubicada la válvula que le permitirá el ingreso o la salida.

La construcción del ballonet y su capacidad volumétrica para albergar el aire dependerán de los cálculos aerodinámicos que se realicen dependiendo del tamaño del dirigible.

5 Prototipo de control de ballonets

El prototipo construido para verificar la funcionalidad del sistema de control de presiones en el dirigible es un globo de 6 metros de longitud, de menor volumen y dimensiones que el que se planea construir al final del proyecto PGA. Se lo prueba en primera instancia en tierra, en donde se verifica la compensación de presión cuando varía la temperatura, humedad e incidencia del Sol.

Después se realizan pruebas en el aire para verificar el control de ascenso y descenso; y, la compensación de presión interna cuando ésta varíe por cambios de altura, presión barométrica, temperatura, etc.

Lo más importante es verificar que la presión interna del globo se mantenga con la ayuda del control de inflado y desinflado del ballonet. El ballonet compensara cuando se produzca un aumento o disminución de presión.

La Figura 3 muestra el diagrama del sistema construido, en el cual se ve la ubicación de los sensores y actuadores involucrados.

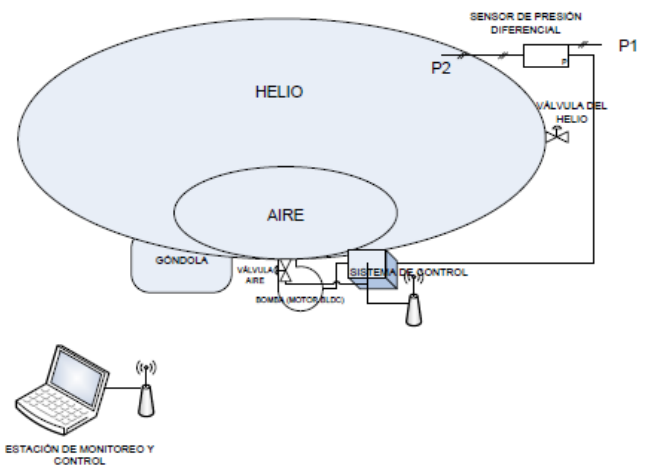


Figura 3. Esquema del prototipo de control de ballonets.

Todas las variaciones de presión y temperatura se reflejan en el cambio de presión diferencial la cual se mide con un sensor que posee dos ductos, el uno mide la presión atmosférica (P1) mientras que el otro mide la presión interna del globo (P2), obteniendo como diferencia entre las dos, la presión diferencial. Figura 4.



Figura 4. Sensor de presión diferencial.

Estos datos son llevados al sistema de control en donde se ejecuta el algoritmo que permite que la diferencia de presión se mantenga, manipulando el ballonet, abriendo o cerrando la válvula y encendiendo o apagando la bomba, compensando las variaciones de presión.

Cabe mencionar que los elementos para manipulación de la entrada y salida de aire son construidos de un material liviano, ya que se debe tener muy en cuenta que el peso es el principal factor que afecta la sustentabilidad del dirigible. Por ello, la válvula está diseñada y construida lo más liviana posible, el diseño y construcción de la válvula fue necesario realizarlo, debido a que después de realizar una amplia búsqueda en el mercado se encontraron válvulas electro neumáticas comerciales demasiado grandes y pesadas que consumen mucha energía. El diseño de la válvula fue hecho pensando en un accionamiento sencillo pero a la vez eficaz que cumple con lo necesario para el funcionamiento del sistema.

El motor empleado es un BLDC³ que está acoplado a la válvula construida mediante un ducto de material liviano. Los dos elementos, tanto la válvula como la bomba serán manejados por el microcontrolador; y, se tienen 2 modos de funcionamiento: modo manual o modo automático.

Finalmente, todos los datos son llevados a la estación de monitoreo y control mediante comunicación inalámbrica para visualizarlos mediante una interface gráfica y guardarlos en una base de datos en el programa Microsoft Excel.

6 Actuadores del sistema

La válvula construida maneja la apertura para el ingreso y extracción del aire del ballonet, tiene como actuador eléctrico un servomotor que gira un ángulo de 180 grados. Este dispositivo se encuentra acoplado a un sistema mecánico con resortes, cuando se necesita abrir la válvula el servomotor gira en un sentido y mediante un pequeño brazo desplaza el tapón hacia arriba y cuando la acción es para cerrar la válvula a más del servomotor que regresa a su posición inicial, los resortes incorporados ayudan a sellar de mejor manera, ya que la válvula es de estado normalmente cerrado.



Figura 5. Válvula y bomba de aire.

³Brushless Direct Current Motor, del Inglés: Motores DC sin escobillas.

El ventilador que se utiliza para ingresar aire al ballonet es un motor BLDC trifásico, el cual es manejado mediante un inversor de velocidad. Este inversor de velocidad permite usar el motor girando en un sentido para poder introducir aire y en el sentido contrario para extraer aire.

El ventilador se encuentra acoplado en una tubería redonda liviana para poder direccionar el flujo de aire de mejor manera. De ahí se conecta con la válvula para después poder acoplar todo el sistema al envoltente del dirigible e interiormente estará conectado al ballonet. En la Figura 5 se muestra el acoplamiento entre la válvula y el ventilador construido.

7 Circuito de control

El circuito de control está compuesto por un microprocesador DSPIC30F3011 que es el elemento principal en donde se encuentra ubicado el algoritmo del control y además maneja todo el envío y recepción de los datos (TRAMAS) desde y hacia la PC.

También se realiza el diseño y construcción del hardware para el acondicionamiento de los sensores y para el manejo de los actuadores.

Para la programación del microcontrolador se utiliza el software MikroC para DSPICs, el cual posee diversas funciones y librerías que permiten realizar el programa de control del sistema.

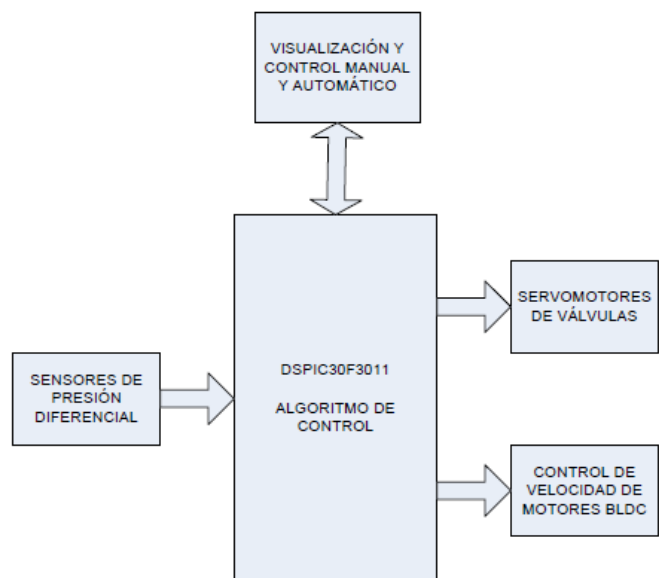


Figura 6. Esquema del circuito de control.

El circuito de control consta de dos etapas, la primera que se encarga de la adquisición de todos los datos de los sensores, los cuales son acondicionados e ingresados por

el conversor análogo digital del DSPIC, en donde se realiza la adquisición, procesamiento y digitalización de los mismos. Luego de ello en el microprocesador se ejecuta el algoritmo de control el cual decide las acciones que el sistema debe tomar para cumplir con sus objetivos.

En la segunda etapa, es en donde se envían las órdenes para la respuesta de los actuadores, esto depende del modo de funcionamiento. En modo manual el operador puede elegir el manejo de los actuadores, pero en modo automático lo realizará el DSPIC.

En todo momento se puede monitorear el valor de la presión diferencial, que es la variable principal en la cual se fundamenta el funcionamiento del sistema de control, por ello los datos son transmitidos desde la tarjeta de control a la PC para ser visualizados y controlados en tiempo real.

En la Figura 6 se tiene un diagrama de bloques del circuito de control.

8 Algoritmo de control

El algoritmo de control es un control con histéresis, se optó por utilizar esta técnica debido a que si se implementara un PID se tendría mayor consumo del motor ya que reaccionaría a cambios pequeños de presión, pero al tener un control con histéresis se tiene una banda en la que el motor no se enciende, sino hasta un valor adecuado. Con esto se consigue disminuir al máximo el consumo de energía.

El funcionamiento del sistema tiene dos modos, modo manual y modo automático.

Para realizar la selección del modo, después que se realiza la comunicación entre el sistema y la PC, se puede escoger el modo de funcionamiento mediante un selector en el HMI.

A continuación se explican más detalladamente los modos de funcionamiento del sistema.

8.1 Modo manual

Al seleccionar el modo de funcionamiento manual, se puede tener acceso y manejar mediante el HMI, los actuadores: válvula y motor. También se puede monitorear el estado de la presión diferencial del dirigible.

Este modo se lo utilizara en tierra para la verificación del funcionamiento del sistema completo. Se podrán verificar la apertura y cierre de la válvula, el encendido y apagado del motor y también monitorear el estado de la presión diferencial.

Además este modo se emplea en el control de ascenso y descenso de la nave, ya que este control no podría ser automático porque dependerá de la situación de la nave y de la decisión que tome el piloto.

8.2 Modo automático

El modo automático permite realizar el control de presión del dirigible. Este modo es muy importante ya que

le permite a la nave mantener la presión interna dependiendo de los cambios de temperatura, cambios de presión barométrica, cambio de altura, etc.

Mantener la presión interna controlada es lo más importante en un dirigible, ya que como su gas de sustentación es el helio, éste al ser sometido a cambios por diferentes condiciones climáticas, haría que el dirigible cambie en su forma, lo cual afecta al sistema de control de vuelo. Por lo tanto el control automático está diseñado bajo un control por histéresis; y, para determinar los rangos dentro de los cuales el globo se mantiene seguro se tuvo que realizar algunas pruebas destructivas y saber hasta dónde puede el globo responder a presiones internas elevadas.

La histéresis por lo tanto tiene dos límites, el límite superior es un valor menor que el máximo determinado en las pruebas destructivas, para tener un rango en el que aun el globo no sufriría daños.

El límite inferior se lo determina hasta cuando el globo puede mantener su forma aerodinámica. De la misma manera se tomó como valor mínimo uno ligeramente mayor para proteger que nunca entre en el límite.

El sistema de control reacciona de tal manera que entre en un valor promedio entre el límite superior y el inferior, al que se lo puede llamar set point; por lo que si en el caso de que la presión descienda el motor se enciende y la válvula se abre para ingresar aire al ballonnet hasta cuando llegue al promedio establecido y no volverá a encenderse hasta que descienda nuevamente del límite inferior.

En el caso de que la presión sea muy elevada, la válvula se abre y el motor gira en sentido inverso extrayendo aire del ballonnet hasta que la presión llegue nuevamente al promedio en donde el motor se apaga y la válvula se cierra.

De la misma manera la válvula y el motor no volverán a encenderse sino hasta cuando la presión sea mayor nuevamente el límite superior.

Con esto se logra optimizar el encendido y apagado del motor y de la válvula y así ahorrar energía que es el principal elemento que debe conservarse.

En la Figura 7 se muestra un gráfico en donde se visualiza la banda de histéresis en la cual se ejecuta el algoritmo de control.

Como límite superior se tiene el valor de 0.02 PSI de presión diferencial, y como límite inferior se tiene 0.01psi de presión diferencial.

Se determinó mediante pruebas destructivas y análisis aerodinámicos que el rango de variación del sistema más adecuado es entre 0.01 y 0.02 PSI de presión diferencial, para proteger de mejor manera el material del envolvente.

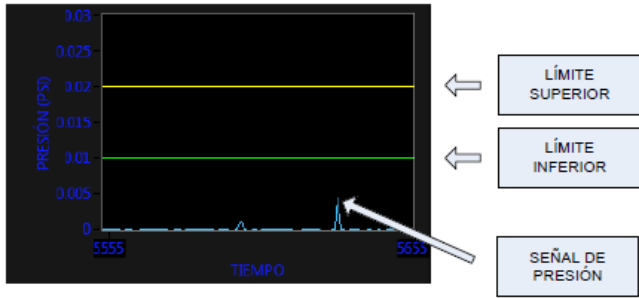


Figura 7. Ventana de Histéresis del Sistema.

Tanto para el modo manual como el automático se tiene como entradas los sensores de presión diferencial, se desarrolla el algoritmo de control en el microprocesador y se envían las señales para que los actuadores entren en funcionamiento.

El diagrama de flujo de la Figura 8 resume el funcionamiento del algoritmo de control del sistema de control de ballonets.

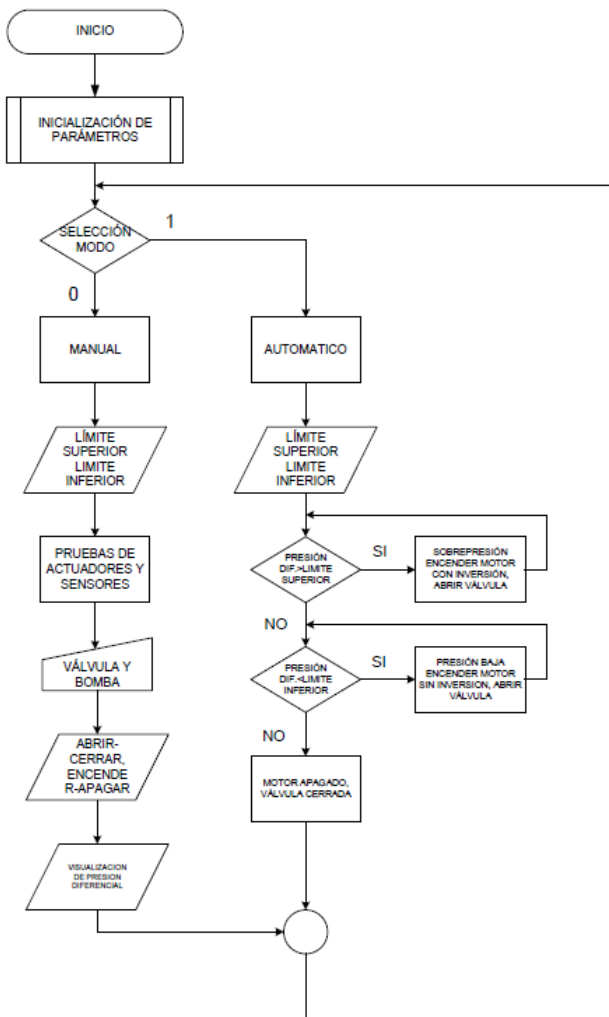


Figura 8. Algoritmo de control.

9 Interfase Humano Maquina (HMI) del sistema de control de ballonets

Para el manejo del sistema se dispone de controles y visualizadores de las variables del sistema.

Como puede verse en la Figura 9, se tiene un diagrama del dirigible y del ballonet que se encuentra en su interior. Además se dispone de dos visualizadores del valor de presión diferencial con una gráfica de la misma en el transcurso del tiempo.

Se tiene un switch que nos permite escoger el modo de funcionamiento del sistema, sea manual o automático.

En modo automático el sistema accederá solo a visualización de los valores de presión ya que en este modo se bloquea la acción para encender de manera manual la válvula o la bomba de aire.

En modo manual, se puede monitorear la presión y manejar de manera manual el encendido o apagado del motor y la apertura o cierre de la válvula. Este modo se lo emplea más en el control de ascenso y descenso, ya que depende de las indicaciones que dé el piloto.

Además en ambos modos se tiene como referencia en la gráfica de la presión, los dos límites del algoritmo de histéresis dentro del cual se considera como una zona segura para mantener a salvo el dirigible y de los cuales se debe tener precaución de no salir.

Esto permite en el modo manual no sobrepasar los límites y mantener al globo con su forma aerodinámica y saber hasta donde poder inflar o desinflar el ballonet.

En el modo automático, en la gráfica de presión vs tiempo, los límites establecidos permiten ver la acción automática del control que realiza el microprocesador. Estos dos límites, tanto el inferior como el superior pueden ser modificados si es necesario, dependiendo del tamaño del dirigible en el cual sea implementado el sistema.

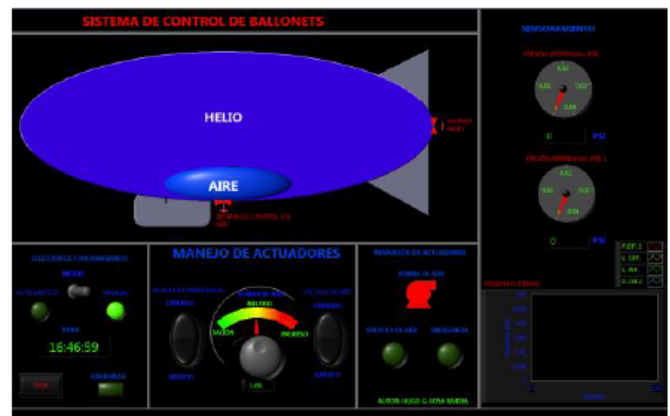


Figura 9. HMI del Sistema de Control de Ballonets.

10 Conclusiones y recomendaciones

1. Los dirigibles son vehículos aéreos que han existido desde hace mucho tiempo, pero su funcionamiento recientemente se lo ha estudiado y comprendido, obteniendo pautas para poder desarrollarlo en nuestro país.
2. Los dirigibles son vehículos aéreos que están sometidos a cambios repentinos de variables físicas, por lo que el prototipo debe tener un monitoreo continuo de todas ellas, pero la principal sin duda es la energía que le permite desplazarse y cuyo monitoreo debe ser primordial, por ésta razón el control en éste trabajo se lo realiza mediante un lazo de histéresis que permite el ahorro de energía al máximo.
3. La presión atmosférica varía con la altura, al igual que la temperatura por lo que este sistema ayudará en la compensación de estas variaciones mediante el control de la presión diferencial del dirigible, como se aprecia en la página de monitoreo.
4. Desarrollar un sistema que sea liviano y efectivo ha constituido un gran reto en esto proyecto, ya que como se ha venido mencionando, el principal inconveniente del dirigible es el peso, por ello se ha desarrollado todo el sistema lo más liviano posible.
5. Manejar el peso del dirigible es de gran ayuda cuando se desea realizar un rápido descenso en caso de emergencia, esto permitirá economizar la energía de los motores principales y sobretodo tratar de hacer descender el dirigible lo más estable posible.
6. Se recomienda un estudio más profundo sobre la temática del control de ballonets ya que a grandes alturas se tendrán condiciones atmosféricas bastante irregulares y pueden surgir nuevos problemas a superar con este control.
7. El proyecto PGA ha abierto las puertas en muchos campos de investigación y de los que se ha adquirido mucha experiencia, por lo que se recomendaría seguir en la investigación de los dirigibles hasta llegar a la implementación de uno que sea totalmente ecuatoriano.
8. Como en todo proyecto estatal se necesita realizar varios trámites en lo que se refiere a importación de sensores que no se dispone en el país, lo cual en muchas ocasiones demora mucho tiempo, paralizando la investigación, por lo que se recomendaría buscar una manera de optimizar los procesos de compra y de importación de dispositivos inexistentes en el país.

Referencias

- [1] Wikipedia.Dirigible, <http://es.wikipedia.org/wiki/Dirigible>
- [2] Omega.Manuals, <http://www.omega.com/manuals/manualpdf/M0258.pdf>
- [3] Wikipedia.Submarino, <http://en.wikipedia.org/>
- [4] Bemto Alexandra, *Modeling and Nonlinear Control for Airship Autonomous Flight*. Tesis Doctoral en Ingeniería Mecánica. Universidad Técnica de Lisboa. Diciembre 2007.
- [5] Wikipedia.Flotalidad, <http://en.wikipedia.org/>
- [6] Aragón Alejandro, Cuevas José, Delgado José, *High-Altitude Platforms for Wireless Communications*. John Wiley & Sons. Singapore. 2008
- [7] MICROCHIP. DSPIC30F3010/3011 Data Sheet. Microchip Technology Incorporated. U.S.A. 2005