

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE CONTROL DE GASES PARA BALLONETS EN UN DIRIGIBLE

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL

HUGO GIOVANNI LOYA RIVERA

giomh_1107@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. PATRICIO BURBANO, M.Sc.

pburbanor@hotmail.com

Quito, noviembre 2010

DECLARACIÓN

Yo Hugo Giovanni Loya Rivera, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Hugo Giovanni Loya Rivera

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Hugo Giovanni Loya Rivera, bajo mi supervisión.

Ing. Patricio Burbano, M.Sc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Primeramente a Dios y a mi familia

A mi director de tesis por su valiosa ayuda

A mis compañeros de trabajo

Y un agradecimiento especial al Director de Proyecto “Plataforma de Gran Altitud”
(PGA), el Coronel Edgar Jaramillo.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a las personas que amo y siempre están ahí para mí, mis padres Eduardo y Victoria, mis hermanos Alexander y Jonathan, por ser quienes me han acompañado en los momentos más felices y duros de mi vida.

CONTENIDO

RESUMEN	I
PRESENTACIÓN	II
CAPÍTULO 1.	1
GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 SISTEMA DE CONTROL DE BALLONETS.....	1
1.3 SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN DE GASES (Gas Management System)	2
1.3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DIRIGIBLES [1] [2].	3
1.3.1.1 Principio físico.....	4
1.3.1.2 Tipos de dirigible.....	4
1.3.1.3 Sustentación	5
1.3.2 SUBMARINOS Y SU HISTORIA [3].	6
1.3.2.1 Inmersión y Navegación	7
1.3.2.2 Flotabilidad	9
1.3.2.2.1 Ley de Boyle-Mariotte	10
1.3.3 ANALOGÍA DIRIGIBLE-SUBMARINO	10
1.3.3.1 Ballonet.....	12
1.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO DE CONTROL DE BALLONETS.....	13
1.4.1 VARIACIÓN DE LA PRESIÓN CON LA ALTURA Y TEMPERATURA AMBIENTE	14
1.4.2 FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.....	14
1.4.2.1 Control de Ascenso y Descenso	15
1.4.2.2 Compensación de presión.....	18
1.4.3 SISTEMA DE CONTROL.....	19
CAPÍTULO 2.	20
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	20
2.1 INTRODUCCIÓN.....	20
2.2 PROTOTIPO DE CONTROL DE BALLONETS.....	21
2.3 CIRCUITO DE CONTROL.....	23
2.4 SENSADO DE VARIABLES DE PRESIÓN DIFERENCIAL.....	24
2.4.1 SENSADO DEL PROTOTIPO	26
2.4.1.1 Acondicionamiento de los sensores de presión diferencial	26
2.4.1.2 Diseño de Fuentes.....	30
2.5 SISTEMA DE ACTUADORES DEL PROTOTIPO	34

2.5.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA VÁLVULA.....	35
2.5.1.1	Sistema electrónico y mecánico de la válvula.....	35
2.5.2	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL VENTILADOR.....	38
2.6	COMUNICACIÓN INALÁMBRICA PARA MONITOREO DEL PROTOTIPO.....	40
2.7	DISEÑO DE LA PLACA DE CONTROL.....	43
2.7.1	CARACTERÍSTICAS DEL MICROPROCESADOR DSPIC30F3011	44
2.7.2	LCD DE VISUALIZACIÓN DE PARÁMETROS.....	46
2.8	CONEXIÓN DE LOS ACTUADORES	47
2.8.1	CONEXIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SERVOMOTOR.....	47
2.8.1.1	Servomotor [13].....	47
2.8.1.2	Funcionamiento del servomotor.....	49
2.8.2	CONEXIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR DE VELOCIDAD PARA EL MOTOR.....	50
CAPÍTULO 3.....		54
DESARROLLO DE SOFTWARE		54
3.1	INTRODUCCIÓN.....	54
3.2	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN MIKRO_C dsPIC.....	54
3.2.1	ALGORITMO DE CONTROL	57
3.2.1.1	Modo Manual.....	58
3.2.1.2	Modo Automático.....	58
3.2.2	PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL	62
3.2.2.1	Módulo PWM para el Control de Motores.....	64
3.2.2.2	Convertor Análogo-Digital	65
3.2.2.3	Módulo de comunicación UART.....	66
3.3	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN LABVIEW 2009.....	67
3.3.1	INTERFASE HUMANO-MÁQUINA (HMI) DEL SISTEMA DE CONTROL DE BALLONETS.....	68
3.3.1.1	Administración de datos en LABVIEW [15].....	70
3.4	PROGRAMACIÓN DE LOS MÓDULOS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA XBEE.....	71
3.5	PROGRAMACIÓN DE LOS CONTROLADORES DE VELOCIDAD.....	72
CAPÍTULO 4.....		75
PRUEBAS Y RESULTADOS.....		75
4.1	INTRODUCCIÓN.....	75
4.1.1	PRUEBAS DE PRESIÓN PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL MATERIAL	75
4.2	PRUEBAS DE PRESIÓN, TEMPERATURA, HUMEDAD SIN SISTEMA DE CONTROL DE BALLONETS.....	77

4.3 PRUEBAS DE LA VÁLVULA Y MOTOR DEL SISTEMA	81
4.3.1 PRUEBAS DE COMPENSACIÓN DE PRESIÓN CON EL SISTEMA DE CONTROL CUANDO VARÍA TEMPERATURA Y HUMEDAD.....	82
4.3.1.1 MODO MANUAL DEL SISTEMA DE CONTROL DE BALLONETS.....	83
4.3.1.2 MODO AUTOMÁTICO DEL SISTEMA DE CONTROL DE BALLONETS.....	86
4.3.2 PRUEBAS DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE DATOS.....	87
CAPÍTULO 5.	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
5.1 CONCLUSIONES.....	89
5.2 RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXOS	95

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar e implementar un prototipo de sistema de control de gases para ballonets, en un dirigible, el cual es monitoreado desde tierra y cuyo funcionamiento en vuelo es controlado manual y automáticamente. El globo emplea helio como gas de sustentación¹, posee cuatro planos de vuelo² móviles para estabilización aerodinámica, un ballonet³; y una góndola que alberga el sistema de energía, instrumentación, control y comunicaciones.

El prototipo dispone de un compartimento de aire, que simula los alojamientos de lastre⁴ en los submarinos, los cuales permiten ganar o perder peso y de esta manera sumergirse o salir a la superficie marina. En este caso, el lastre es el aire el cual infla o desinfla el ballonet, ganando o perdiendo peso, para poder descender o ascender el dirigible respectivamente; y además permite mantener la forma aerodinámica del mismo, cuando se produzcan cambios de presión interior del helio, debido a la variación de temperatura, presión barométrica, humedad, velocidad del viento. Todas estas variaciones se reflejan en un cambio de presión diferencial, que es la variable en base a la cual se realiza el control automático.

Para comandar el sistema se utiliza un microprocesador DSPIC30F3011 de Microchip, además se construye el hardware para el manejo de entradas de los sensores, y de salidas dedicadas para manipular los actuadores como ventiladores y válvulas que están involucrados en el prototipo.

Toda la información de telemetría⁵ y control es llevada a tierra, gracias al uso de radio módems inalámbricos, la cual es administrada y visualizada en un HMI en la estación base de control.

¹ En aeronáutica, la sustentación es la fuerza de levantamiento que permite que un cuerpo se mantenga en el aire.

² Estructuras aerodinámicas que permiten el control de una aeronave

³ Cámara de aire que mantiene la presión interna del dirigible en las variaciones de presión del helio.

⁴ En submarinos, agua que le permite ganar o perder peso para controlar su posición.

⁵ Instrumentos para la medición de variables como altura, niveles de energía, velocidad del viento, GPS, etc.

PRESENTACIÓN

El Proyecto Plataforma de Gran Altitud (PGA), es un proyecto de interés nacional, que lleva consigo muchas aplicaciones dentro del campo de desarrollo tecnológico del país. Este proyecto se lo realiza con fines de investigación y además brindará servicios de las tecnologías de comunicación como son Internet, televisión, telefonía entre los principales, a los cuales las comunidades sobre todo rurales podrán acceder.

El sistema de comunicaciones de mediana altura (por medio de globos aerostáticos en una determinada región) es más barato que el sistema de comunicaciones satelitales, razón por la cual la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT), ha encargado al Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (CIDFAE) este Proyecto. Para cumplir con este objetivo, la FAE trabaja en colaboración con el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y con la Escuela Politécnica Nacional (EPN), en especial con los Departamentos de Física en la parte de energía, con el Departamento de Materiales, con el Departamento de Matemáticas para el modelamiento matemático del clima a las diferentes alturas, con el Departamento de Telecomunicaciones para el ámbito de comunicaciones y se ha solicitado al Departamento de Automatización y Control Industrial (DACI) la asesoría en la parte de control automático del proyecto.

Como parte del área de control, se desarrolla un sistema de control de gases (Ballonets), que permita manipular la altura en un dirigible manteniendo su forma aerodinámica.

Con la finalidad de alcanzar el objetivo establecido, en la primera parte del proyecto, se estudia y comprende el funcionamiento de los dirigibles, en lo que se refiere al control de guiado y navegación de la nave, para después, comprender la importancia de un control que permita mantener la presión interna del dirigible, cuando es sometido a cambios de altura, presión barométrica, humedad y temperatura, los

cuales se reflejarán en un cambio de presión diferencial, que será la variable principal, en la que se centra el control automático.

En la segunda parte del proyecto, se describe el fundamento teórico del prototipo de sistema de control de gases, que se construye explicando el funcionamiento de dicho sistema y las variables a ser tomadas en cuenta para realizar el control automático. También se hace un estudio de la historia de los dirigibles y su funcionamiento.

Continuando con el desarrollo del presente proyecto, en el tercer capítulo se detalla el diseño y la construcción del prototipo, el desarrollo del software de control para el microprocesador y el diseño de la interface gráfica HMI para el monitoreo y visualización de las variables de los sensores, y verificación del funcionamiento de los actuadores.

En el cuarto capítulo se muestran los datos y registros de las pruebas experimentales del prototipo para poder verificar su funcionabilidad.

Se presentan en el quinto capítulo, las conclusiones y recomendaciones a las cuales se ha llegado durante todo el desarrollo del proyecto.

Finalmente se presentan anexos, tales como las hojas de especificaciones de los dispositivos utilizados para la implementación del sistema, así como las placas diseñadas y fotos del sistema terminado.

CAPÍTULO 1.

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

A medida que ha ido evolucionando el “*Proyecto Plataforma de Gran Altitud*”, se han desencadenado nuevos retos para llegar a la culminación del mismo, el presente proyecto de titulación lleva consigo la responsabilidad de construir un sistema que ayude al área de guiado, navegación y control del dirigible.

El control de un dirigible es un campo bastante extenso, en el cual se necesita manejar muchas variables, porque es un sistema que está sometido a diversas condiciones atmosféricas y físicas. El control de un dirigible, se lo puede encontrar desarrollado en el proyecto de titulación del Ing. Jaime David Torres Quezada, cuyo título es “**CONTROL DE POSICIÓN DE UN GLOBO AEROSTÁTICO UTILIZANDO SISTEMA INS/GPS**”. En este trabajo se explica de manera más profunda como se realiza el control manual y automático de un dirigible.

El presente proyecto de titulación tiene por objetivo desarrollar un prototipo de sistema de administración de gases, que sirva de complemento para mejorar el control del dirigible, cuando éste sea llevado a grandes alturas y sometido a diversas condiciones atmosféricas.

1.2 SISTEMA DE CONTROL DE BALLONETS

Por lo general los dirigibles constan de un sistema de administración de gases, basado en la construcción de por lo menos un compartimiento de aire (ballonet), que permite manipular su ascenso y descenso, y mantener su forma aerodinámica mediante la introducción o extracción de aire. Este sistema también permite al dirigible ganar o perder peso cuando se requiere ascender o descender, ayudando a los motores principales de propulsión para economizar energía.

Se desarrolla un sistema de control de gases, para ballonets en un dirigible, para controlar su posición y mantener su forma aerodinámica durante el vuelo, mediante la manipulación de la presión a la cual se encuentra sometido.

La propiedad fundamental del dirigible es que es de tipo no rígido y en su interior aloja helio como gas de sustentación. La desventaja del helio es que es un gas, que sometido a ciertas condiciones atmosféricas y climáticas varía su volumen, lo cual afecta a la navegabilidad de la nave.

El sistema de control de gases es un sistema que permita controlar la presión interior del dirigible, de acuerdo a las condiciones atmosféricas a la que sea sometida la nave.

1.3 SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN DE GASES (Gas Management System)

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 emplean los llamados ballonets, los cuales se encuentran en el interior del dirigible, como se ve en la Figura 1.1 y cuya manipulación permite cumplir las 2 funciones antes mencionadas.



Figura 1.1 Dirigible no rígido de 9 m de longitud, sustentado con helio y en su interior se muestra el ballonet desinflado.

Para comprender el funcionamiento del ballonnet dentro de un dirigible, se procede a realizar una analogía entre el funcionamiento de un submarino, con sus compartimientos de lastre y las bolsas construidas dentro del envoltorio del dirigible.

1.3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DIRIGIBLES [1] [2].

Se conoce como dirigible a un aeróstato 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. Difiere de la sustentación aerodinámica, obtenida mediante el movimiento rápido de un perfil alar, como en el ala de un aeroplano o la hélice de un helicóptero.

En la Figura 1.2 se visualiza un dirigible comercial utilizado para realizar cruceros turísticos en Suiza.



Figura 1.2 Dirigible comercial

Históricamente, fue el primer artefacto volador capaz de ser controlado en un vuelo largo. Entre el año 1900 y la década de 1930 fue cuando se produjo su mayor uso; luego de lo cual fue disminuyendo paulatinamente, cuando sus capacidades fueron superadas por la de los aeroplanos, y además, después de sufrir varios accidentes de relevancia, el más notable de los cuales fue sin duda el incendio del Hindenburg⁶.

⁶ El LZ 129 Hindenburg fue un dirigible alemán tipo zeppelin destruido a causa de un incendio cuando aterrizaba en Nueva Jersey el 6 de mayo de 1937.

Actualmente se los utiliza en una serie de aplicaciones secundarias, especialmente publicidad.

1.3.1.1 Principio físico

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, recibirá una fuerza ascensional resultante (P) equivalente al peso de aire ocupado por su volumen (V), menos el peso de su estructura y su carga (Q).

Siendo γ el peso específico del gas utilizado para llenar los depósitos del dirigible, y Γ el del aire, entonces:

$$P = V * (\Gamma - \gamma) - Q \quad (1.1)$$

1.3.1.2 Tipos de dirigible

Dirigible rígido: se caracterizan por poseer una estructura rígida, que sostiene múltiples celdas o globos de gas no presurizado, por lo tanto, no dependen de la presión interna del gas para mantener su forma. Ejemplo: los Zeppelín⁷ (Figura 1.3).



Figura 1.3 Dirigible D-LZ-127 Graf Zeppelin

⁷ Dirigible rígido

Dirigible no rígido: este tipo de dirigibles utilizan la presión del gas interno para retener su forma. Pueden ser globos de observación, exploración que se diferencian de los aerostatos por la posibilidad de dirigir su movimiento horizontal, ya sea mediante hélices u otros mecanismos. (Figura 1.4).



Figura 1.4 Fotografía de un dirigible con su sistema de propulsión, un motor ubicado a cada lado del envoltente.

Además se considera que existe una tercera clasificación que podría situarse dentro del grupo de los dirigibles no-rígidos; el dirigible semi-rígido el cual requiere una presión interna generalmente menor, ya que incluyen estructuras bajo el globo que permiten distribuir las cargas. El uso ha sido similar al de los dirigibles no rígidos.

1.3.1.3 Sustentación

En los primeros tiempos de los dirigibles, el principal gas de sustentación utilizado fue el hidrógeno, en cambio en Estados Unidos se usó helio. Hasta el año 1950 se continuó utilizando el hidrógeno en todo el mundo por diversas razones: menor densidad que el helio, incapacidad para obtenerlo fuera de Norteamérica (hasta ese

momento único productor) y además por cuestiones económicas, al ser mayor el precio del helio.

El hidrógeno es extremadamente inflamable, característica que causó el desastre del Hindenburg, así como otros accidentes (si bien hay teorías recientes que exculpan al hidrógeno de la causa de ese desastre). La sustentación que provee el hidrógeno es sin embargo sólo un 8% mayor que la del helio, pero con el transcurso del tiempo se ha optado por utilizar el helio como gas de sustentación, por seguridad de las personas que lo manipulan.

1.3.2 SUBMARINOS Y SU HISTORIA [3].

Un submarino es un tipo especial de buque, capaz de navegar bajo el agua además de la superficie marina, gracias a un sistema de flotabilidad variable⁸. Fueron usados extensamente por primera vez en la Primera Guerra Mundial, en la actualidad forman parte de todas las armadas importantes.

El término “submarino” comprende una amplia gama de tipos de buque, yendo desde los pequeños para dos personas, que sirven para examinar el fondo del mar unas pocas horas, hasta los nucleares, que pueden permanecer sumergidos durante año y medio y portar misiles nucleares (Figura 1.5).



Figura 1.5 Submarino nuclear, Marina de los Estados Unidos.

⁸ Capacidad de un cuerpo para modificar su flotación dentro del fluido.

1.3.2.1 Inmersión y Navegación

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 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 [3].

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. Durante la inmersión, los tanques principales suelen permanecer inundados, lo que simplifica su diseño, por lo que en muchos submarinos estos tanques son simplemente una sección del espacio entre los cascos. Para un control manual más rápido y preciso de la profundidad, los submarinos disponen de unos tanques de control de profundidad más pequeños, capaces de soportar presiones más altas. La cantidad de agua en estos tanques puede controlarse tanto para responder a cambios en las condiciones exteriores como para cambiar la profundidad de inmersión. Dichos tanques pueden situarse cerca del centro de gravedad del submarino, o distribuirse por el buque para evitar afectar a la escora⁹.

En inmersión, la presión del agua sobre el casco del submarino puede alcanzar los 3 MPa¹⁰ en los submarinos de acero y hasta los 10 MPa en los de titanio, como los Komsomolets¹¹, permaneciendo constante la presión interior. Esta diferencia provoca la compresión del casco, lo que disminuye el desplazamiento. La densidad del agua también se incrementa, pues la salinidad y la presión son mayores, pero esto no compensa la compresión del casco, así que la flotabilidad disminuye con la

⁹Inclinación que toma un buque cuando éste se aparta de la vertical al sufrir un corrimiento de la carga u otros motivos.

¹⁰MPa siglas de medida de presión en Mega Pascales.

¹¹ Submarino soviético K-278 Komsomolets, su casco interior es de titanio, y alcanza el récord de inmersión de 1300 metros.

profundidad. Un submarino sumergido está en equilibrio inestable, teniendo tendencia a caer hacia el fondo o flotar hacia la superficie. Mantener una profundidad fija exige la operación continua de los tanques de control de profundidad.

Para mantener la escora deseada, los submarinos usan tanques de escora especializados a proa y popa. Las bombas trasladan agua entre ellos, cambiando la distribución del peso y creando así un momento que gira el buque hacia arriba o hacia abajo. Un sistema parecido se usa a veces para mantener la estabilidad.

El efecto hidrostático de los tanques de lastre variable no es la única forma de controlar el submarino bajo el agua. La maniobra hidrodinámica se logra mediante varias superficies, que pueden ser giradas para crear las correspondientes fuerzas hidrodinámicas, cuando el submarino se desplaza a la suficiente velocidad. Los planos de popa, situados cerca del propulsor y orientados por lo general horizontalmente, sirven para el control de la inclinación longitudinal del submarino, y son de uso común, a diferencia de otras superficies de control de las que pueden carecer algunos submarinos. Los planos de inclinación en la torreta¹² y los de popa en el cuerpo principal, ambos también horizontales, se sitúan más cerca del centro de gravedad y son utilizados para controlar la profundidad con menos efecto sobre la inclinación.

Para lograr que un submarino realice una emersión de emergencia, se usan simultáneamente todos los métodos de control de la profundidad y la escora para propulsar al buque hacia arriba. Dicha emersión es muy rápida, por lo que el submarino puede incluso saltar parcialmente fuera del agua.

En la actualidad, los submarinos tienen un sistema de guía inercial para navegar bajo el agua, pero el error de deriva se acumula inevitablemente con el tiempo. Para contrarrestarlo, se usa periódicamente el GPS para obtener una posición exacta. El

¹² Dispositivo que protege la tripulación o los mecanismos de un arma lanza proyectiles y al mismo tiempo sujeta el arma y dispara en muchas direcciones.

periscopio¹³ sólo se usa ocasionalmente, debido a que su rango de visibilidad es corto. Los submarinos modernos tienen mástiles optrónicos en lugar de periscopios de tubos ópticos que penetran en el casco. Estos mástiles tienen que seguir subiéndose a la superficie al igual que el periscopio, pero emplean sensores electrónicos para la luz visible y la infrarroja, telémetro láser y dispositivos de vigilancia electromagnética.

1.3.2.2 Flotabilidad

Se define como flotabilidad a la capacidad de un cuerpo para sostenerse dentro del fluido. Un cuerpo está en flotación cuando permanece suspendido en un entorno líquido o gaseoso, es decir en un fluido. Un objeto flotará sobre un fluido (ambos bajo el efecto fuerza de una gravedad dominante) siempre que el número de partículas que componen el objeto sea menor al número de partículas del fluido desplazadas [4].

Cuando un cuerpo se encuentra dentro de un fluido, la flotabilidad se determina por las diferentes fuerzas que actúen sobre el mismo y el sentido de las mismas. Se conoce como flotabilidad positiva cuando el cuerpo tienda a ascender dentro del fluido, negativa cuando el cuerpo tiene a descender dentro del fluido y neutra cuando se mantiene en suspensión dentro del fluido. La flotabilidad viene establecida por el Principio de Arquímedes, y si el cuerpo fuera de naturaleza compresible¹⁴ su flotabilidad se verá modificada al variar su volumen, según la Ley de Boyle-Mariotte.

La capacidad de flotación de un cuerpo después de ser calculada y modificada, tiene importantes aplicaciones en la vida cotidiana, como pueden ser:

- Diseño de naves: barcos, submarinos.
- Diseño de aerostatos: globo, zeppelines.
- Práctica de deportes subacuáticos: buceo, pesca submarina, etc.

¹³ Instrumento para la observación desde una posición oculta.

¹⁴ Compresibilidad es una propiedad de la materia a la cual se debe que todos los cuerpos disminuyan de volumen al someterlos a una presión o compresión determinada manteniendo constantes otros parámetros.

1.3.2.2.1 Ley de Boyle-Mariotte

La Ley de Boyle-Mariotte (o Ley de Boyle), formulada por Robert Boyle y Edme Mariotte, es una de las leyes de los gases ideales, que relaciona el volumen y la presión de una cierta cantidad de gas, mantenida a temperatura constante [5]. La ley dice que el volumen es inversamente proporcional a la presión:

$$PV = k \quad (1.2)$$

Donde k es constante si la temperatura y la masa del gas permanecen constantes.

Cuando aumenta la presión, el volumen disminuye, mientras que si la presión disminuye el volumen aumenta. El valor exacto de la constante k no es necesario conocerlo para poder hacer uso de la Ley, manteniendo constante la cantidad de gas y la temperatura, deberá cumplirse la relación:

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad (1.3)$$

1.3.3 ANALOGÍA DIRIGIBLE-SUBMARINO

Luego de haber revisado un poco de la historia y funcionamiento de los submarinos y dirigibles, se puede comprender que existe una analogía entre los dos, ya que ambos se desempeñan dentro de un fluido, en el caso del submarino dentro del agua y para el dirigible se tiene la mezcla gaseosa conocida como aire, por lo que se podría decir que el principio de sustentación es similar para los dos.

Como conclusión, ambos requieren 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 1.6 se puede ver la analogía entre los compartimientos de un dirigible y de un submarino.

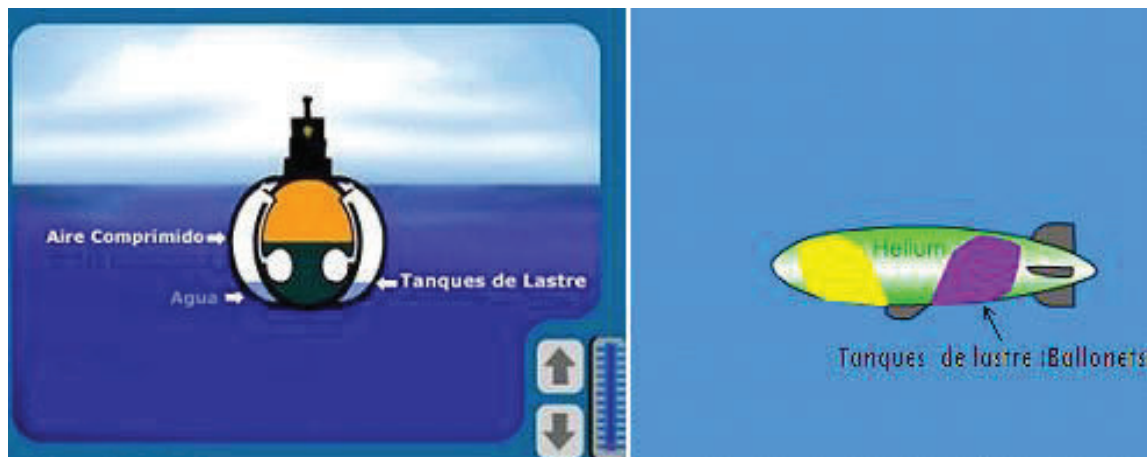


Figura 1.6 Analogía entre los compartimientos de lastre de un submarino y de un dirigible

Como puede verse en la Figura 1.6, el submarino tiene dos tanques de lastre que contendrán agua o aire comprimido, en cambio en la figura del dirigible se puede observar la presencia de dos ballonets. El número de ballonets en el interior de un dirigible dependerá de las características aeronáuticas del mismo, como tamaño y volumen, para el caso del prototipo a ser construido constará de un solo ballonet.

Además puesto que dentro del envolvente se encuentran ubicados los ballonets, y en su parte exterior se tienen ubicados los planos de vuelo¹⁵, la góndola¹⁶ y demás dispositivos de telemetría para el control de la nave, se debe tener en cuenta que mantener la forma aerodinámica es indispensable, para tener el control total del

¹⁵ Superficies aerodinámicas que permiten controlar el enrumbamiento del dirigible, similar a las alas y alerones de un avión.

¹⁶ Compartimiento rígido en el que se aloja el equipo de vuelo (sistema de propulsión, baterías, control de planos de vuelo).

dirigible y esto se logra gracias a la compensación que realiza el sistema de control de ballonets, cuando exista cambios de presión interna, debido a la variación de altura, humedad, presión barométrica y temperatura. En la figura 1.7 se ve la distribución de dos ballonets, la góndola, planos de vuelo y los sistemas de telemetría.

En este gráfico se observa un dirigible no rígido construido con dos ballonets en su interior. El timón vertical o rudder permite a la nave orientarse a la derecha o a la izquierda.

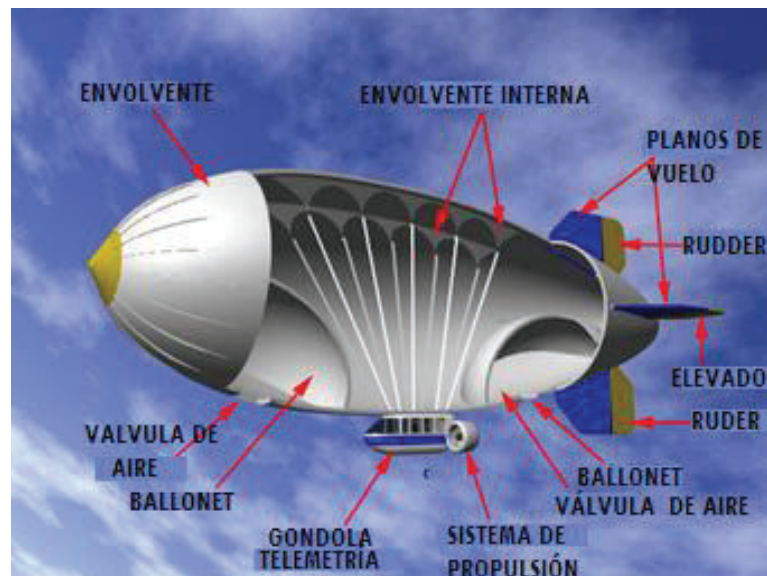


Figura 1.7 Envoltente, ballonet y sus respectivas válvulas.

1.3.3.1 Ballonet

Es un compartimento construido del mismo material que el envoltente, el cual llevará 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.

1.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO DE CONTROL DE BALLONETS

El prototipo a ser construido permite controlar el llenado y vaciado del ballonnet, mediante el uso de motores BLDC¹⁷ empleados como ventiladores o extractores de aire y también realiza el control de actuadores, en este caso válvulas que se abrirán y cerrarán en el momento que sea necesario introducir o extraer aire, de acuerdo a la variación de la presión diferencial.

En la Figura 1.8 se puede ver el diagrama del sistema de control de ballonets, en este caso se tiene un ballonnet, una válvula para el ingreso de aire y una válvula general que permite el llenado del globo con helio.

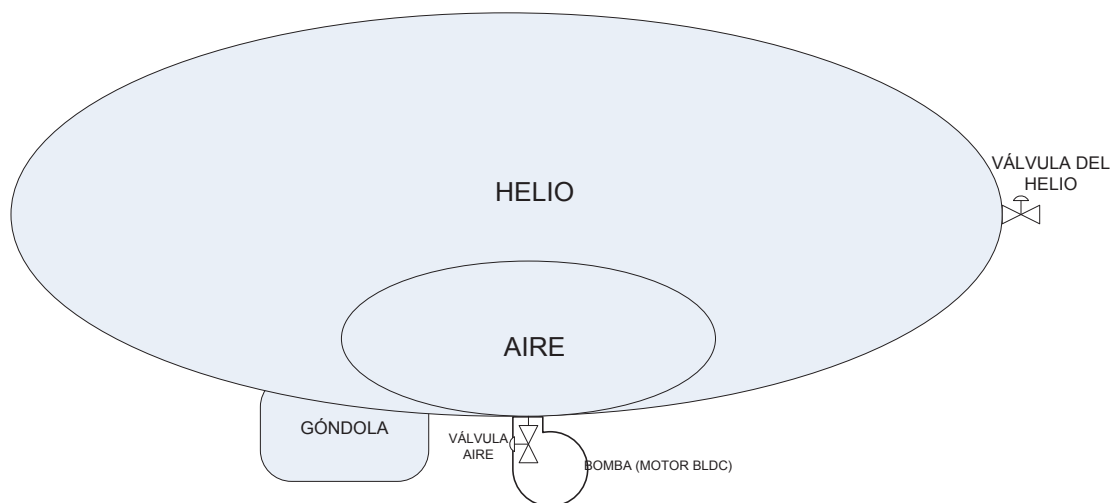


Figura 1.8 Diagrama del sistema de control de ballonets.

El sistema de control construido consta de dos fases para realizar el control del dirigible.

La primera fase trata del control de presión interna para mantener la forma aerodinámica y la segunda trata del control ascenso y descenso. Más adelante serán explicadas con mayor detalle.

¹⁷Brushless Direct Current Motor, del Inglés: Motores DC sin escobillas.

1.4.1 VARIACIÓN DE LA PRESIÓN CON LA ALTURA Y TEMPERATURA AMBIENTE

El efecto que tiene la variación de la presión atmosférica y de la altura sobre el globo, genera que éste se expanda o se contraiga, además se tiene también el efecto de la temperatura ambiente, lo cual hace que el helio tome la característica de expandirse si la temperatura aumenta, o comprimirse si la temperatura desciende.

A continuación, el gráfico de la Figura 1.9 muestra la relación de variación de la presión atmosférica con la altura, temperatura y velocidad del viento, variables que afectarían directamente el cambio de presión interna del dirigible.

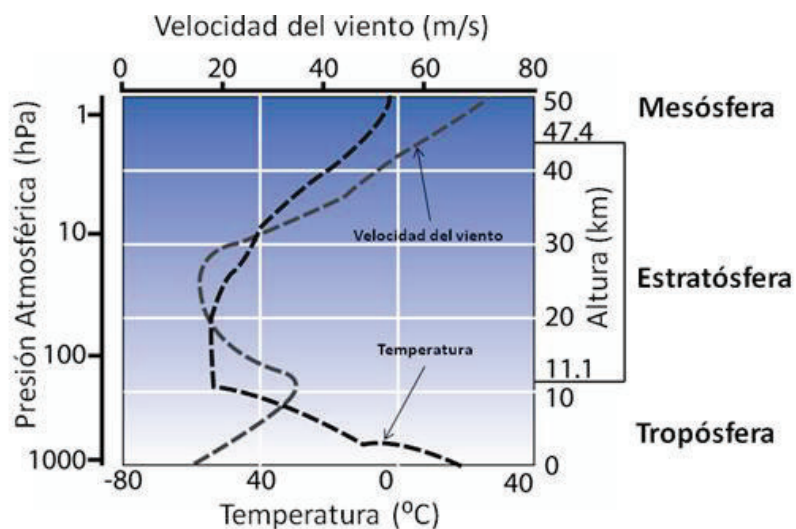


Figura 1.9 Velocidad del viento y temperatura para diferentes alturas y presiones atmosféricas [6].

El helio es un gas que varía mucho con ciertas condiciones ambientales, como son temperatura, humedad; para compensar esta variación entra en funcionamiento el sistema de control de ballonets.

1.4.2 FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

El prototipo permite tener un control de ascenso-descenso y un control de presión interna del dirigible, debido a que el Helio es un gas cuyo volumen varía con facilidad

ante cambios de temperatura y presión atmosférica con la altura, el ballonet de aire permite compensar estos cambios para mantener la presión interna y forma del dirigible.

1.4.2.1 Control de Ascenso y Descenso

El prototipo permite tener un control de ascenso-descenso, manipulando para ello el peso del ballonet inflándolo o desinflándolo. Para este propósito se tienen una válvula de ingreso de aire y un motor BLDC (Figura 1.10a) con un controlador de velocidad con inversión de giro (Figura 1.10b) para que funcionen como bomba o como extractor de aire.

El controlador de velocidad, que en esencia es un inversor DC-AC, varía la frecuencia de la alimentación trifásica del motor.

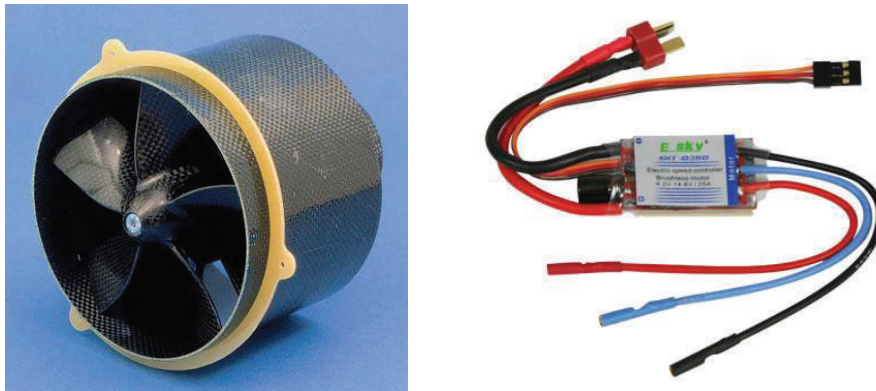


Figura 1.10 a) Motor BLDC b) Controlador de velocidad con inversión de giro.

Para realizar la conexión del controlador de velocidad al motor, se dispone de tres conectores que representan las tres fases que requiere el motor, dos conectores para la batería LiPo de 11.1 V DC con polaridad positiva y negativa, un conector para la señal de control PWM que envía el DSPIC y un switch de activación del dispositivo. En la Figura 1.11 se muestra un diagrama de bloques de conexión del controlador de velocidad.

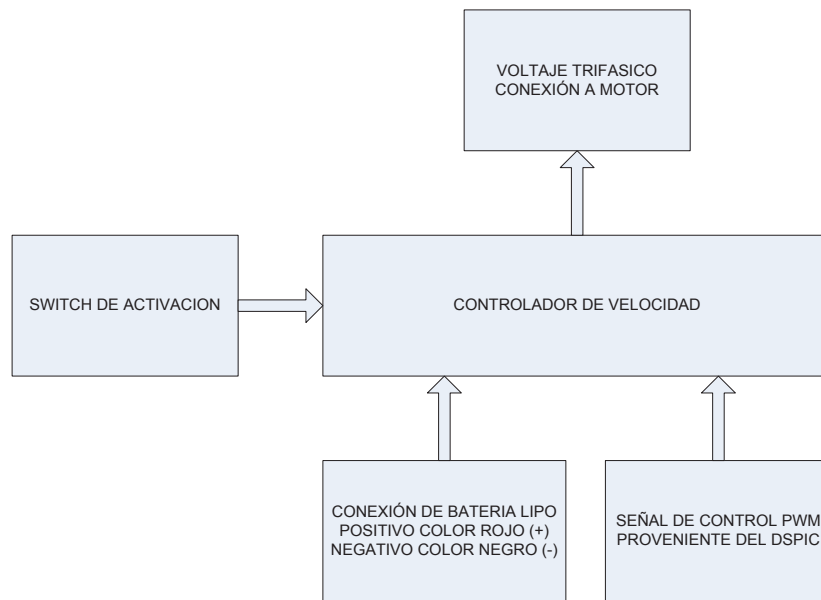


Figura 1.11 Diagrama de bloques de conexión del controlador de velocidad.

Entonces, el sistema de control de ascenso y descenso funcionará de la siguiente manera:

Cuando la nave está por despegar se tiene el ballonet lleno, y conforme se vaya ganando altura el aire irá saliendo, con lo cual se pierde peso de acuerdo a la necesidad que el piloto disponga, si es el caso de descender, el ballonet procederá a inflarse ganando peso y llevando el dirigible a tierra. Se debe siempre tener en cuenta que la presión atmosférica, mientras se asciende va disminuyendo y al momento de descender va aumentando.

En la Figura 1.12 se ve el funcionamiento del sistema, en este caso al momento del ascenso se tiene los ballonets inflados al 100% y mientras la nave va ganando altura, serán desinflados paulatinamente, hasta cuando se tenga los ballonets completamente vacíos. De la misma manera en el descenso se inflan los ballonets completamente para poder ganar peso y de esta manera llevar el dirigible a tierra.

El control de ascenso y descenso es muy importante cuando se requiera llevar el dirigible a tierra, si se produjera una situación de emergencia, con esto se garantiza

que si se pierde el control de los motores principales, el dirigible descenderá por el peso del aire que lleva como lastre, garantizando con esto la recuperación del mismo.

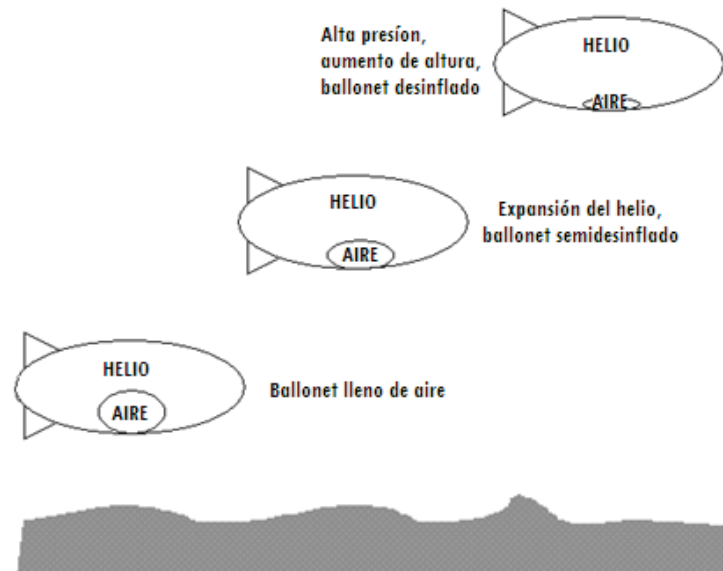


Figura 1.12 Sistema de control de ballonets en el ascenso y descenso.

Cabe recalcar que el ascenso del prototipo final de Proyecto Plataforma de Gran Altitud, será hasta la altura que se llama techo máximo de servicio, en donde se pretende que el globo se mantenga aerosustentado, para poder cumplir con los objetivos de comunicación y otros para los cuales se está desarrollando el proyecto. Pero para el caso del prototipo que se construye, primero se lo prueba en tierra y después se comprueba el control de ascenso y descenso hasta una determinada altura, ya que para llegar a alturas más grandes se tiene que aumentar el tamaño del dirigible y por lo tanto aumentar el tamaño de los actuadores del sistema, para lo cual se tendrá que rediseñar la parte aeronáutica.

El volumen de helio, así como el volumen de aire que lleva el dirigible, son diseñados por el área de aeronáutica, ya que de éstos depende la carga útil¹⁸ que podrá elevar el dirigible.

¹⁸ Se refiere a los equipos que viabilizarán las aplicaciones para la cual está destinado el prototipo y que no están relacionados con las operaciones de aeronavegabilidad.

Este sistema ayuda al piloto a utilizar lo menos posible los motores principales, ya que la manipulación del peso del dirigible, mediante los ballonets, ayuda en el ascenso o descenso y esto es muy importante, ya que en este tipo de aeronaves la energía debe ser muy bien administrada.

1.4.2.2 Compensación de presión

Otra consideración que se debe tener en cuenta, es que el volumen total del dirigible debe mantenerse constante y que la presión interna debe ser mayor o igual a la presión atmosférica, para mantener la forma aerodinámica del globo (Figura 1.13).

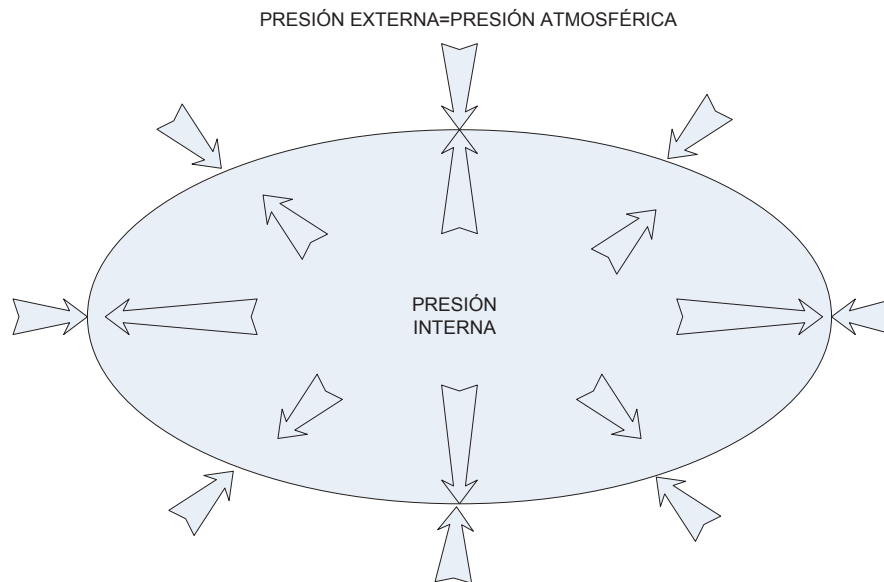


Figura 1.13 Presión interna y externa para mantener la forma del dirigible.

Este sistema también permite, como se mencionó antes, compensar cuando existan variaciones de presión interna de helio. Esto es muy importante, ya que si existe una expansión del helio por tener baja presión atmosférica o una alta temperatura, el ballonet tendrá que desinflarse para compensar la presión, y si en cambio se tiene un descenso brusco de temperatura, el globo puede perder su forma aerodinámica inutilizando los planos de vuelo, con lo cual el piloto podría perder en parte control de la nave.

Lo fundamental del sistema es mantener la presión interna del dirigible, manteniendo así su forma aerodinámica y también permitir un mejor control de la nave, ayudando al sistema de propulsión eléctrico.

1.4.3 SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control se desarrolla en base a un microprocesador DSPIC30F3011 con entradas para los sensores de presión diferencial, y con salidas PWM para el manejo de los controladores de los motores BLDC trifásicos, y servomotores para activación y desactivación de válvulas.

La información de todos los dispositivos y el control son transmitidos a tierra gracias a la ayuda de radios inalámbricos con antenas dedicadas para la aplicación, para así poder manipular el sistema desde la estación base ubicada en tierra.

Finalmente el sistema tendrá una INTERFASE HUMANO MÁQUINA (HMI) para su monitoreo y control, que sea amigable con el piloto y los operadores asignados para esta tarea.

En el siguiente capítulo se detalla el diseño y construcción del sistema.

CAPÍTULO 2.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

2.1 INTRODUCCIÓN

De manera general el prototipo construido, es un sistema de control compuesto de sensores de presión diferencial, cuyas señales son acondicionadas para luego ingresarlas a un microprocesador DSPIC30F3011, por medio de su conversor análogo digital, para su respectivo procesamiento y digitalización. De la misma manera se tienen salidas del microprocesador con señales para manejar el servomotor, que se encuentra acoplado al accionamiento mecánico de la válvula de ingreso y salida de aire, y también para el manejo del controlador de velocidad que se encuentra conectado al motor BLDC.

Los servomotores son dispositivos que funcionan con señales PWM, las cuales serán generadas por el microprocesador y también se las emplea para manejar los controladores de velocidad.

Para la adquisición de las señales de los sensores, se emplea los conversores análogo-digital del microprocesador, con una etapa previa de acondicionamiento, para realizar un acoplamiento de impedancias y evitar el ingreso de ruido.

Todos los datos son llevados desde la tarjeta de control a una Interfase Humano-Máquina HMI, por medio del protocolo de comunicación inalámbrico, empleando para ello radios con antenas de gran alcance.

Finalmente, el sistema funciona en modo manual y automático mediante la creación de un algoritmo de control con histéresis.

2.2 PROTOTIPO DE CONTROL DE BALLONETS

El prototipo construido, para verificar la funcionabilidad del sistema de control de presiones en el dirigible, es un globo de 6 metros de longitud, de menor volumen y dimensiones que aquel 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 ballonnet. El ballonnet compensará cuando se produzca un aumento o disminución de presión.

La Figura 2.1 muestra el diagrama del sistema construido, en el cual se ve la ubicación de los sensores y actuadores involucrados.

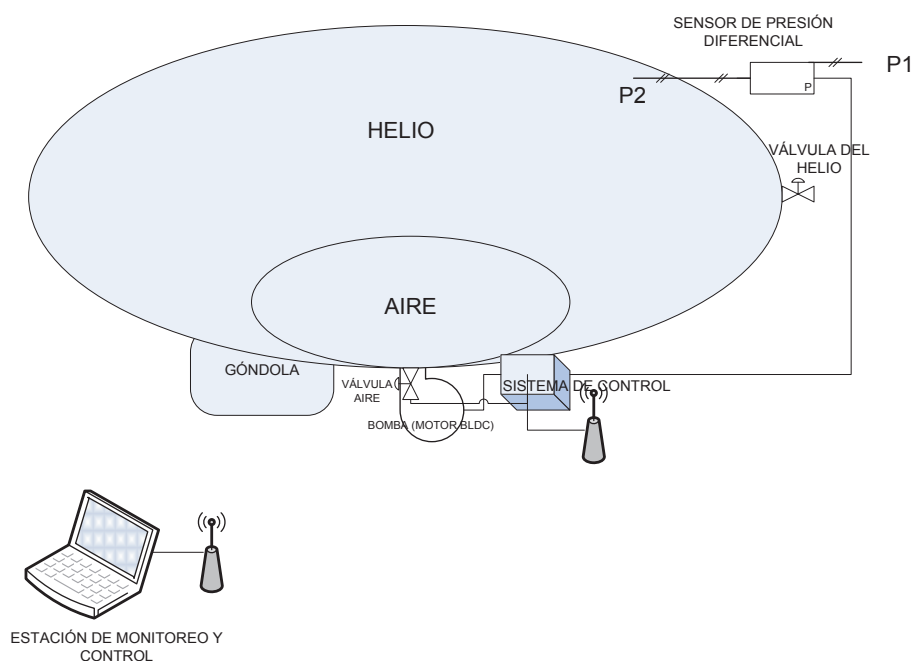


Figura 2.1 Esquema del prototipo de control de ballonets.

Todas las variaciones de presión y temperatura se reflejan en el cambio de presión diferencial, la cual se mide con un sensor, el cual 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. 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 contruidos 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 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 se realiza 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 BLDC que está acoplado a la válvula construida mediante un ducto de material liviano. Los dos elementos, tanto la válvula como la bomba son manejados por el microcontrolador; y, se tienen 2 modos de funcionamiento: manual y automático.

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

2.3 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 ello se emplea un software de diseño de circuitos electrónicos impresos.

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.

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 realiza 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 2.2 se tiene un diagrama de bloques del circuito de control.

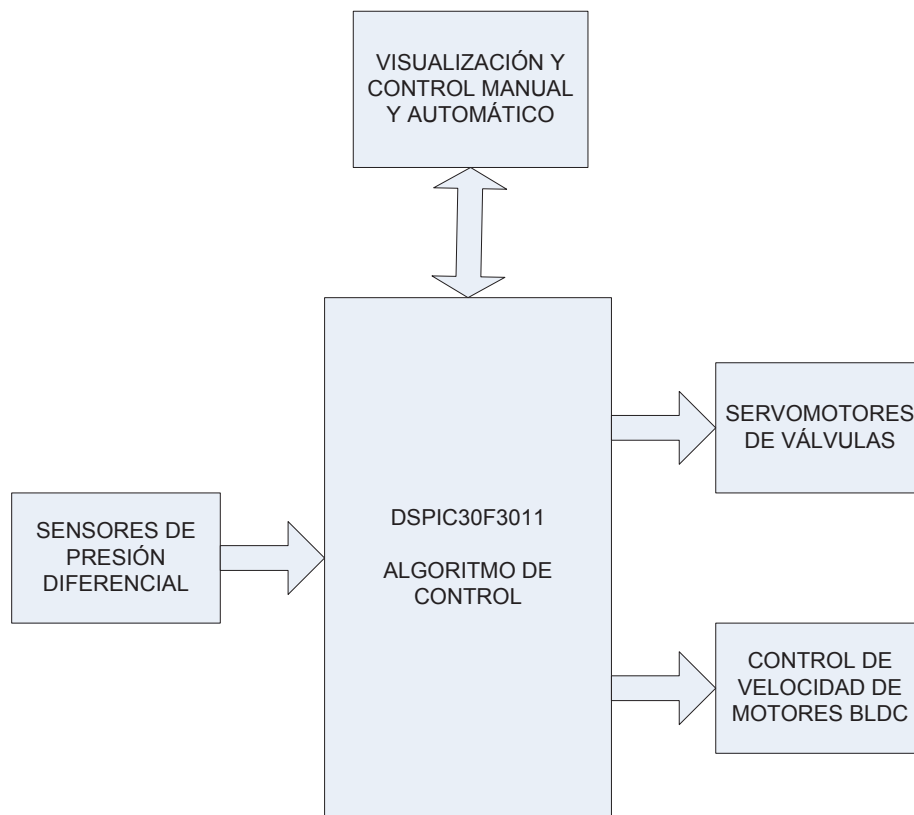


Figura 2.2 Esquema del circuito de control.

2.4 SENSADO DE VARIABLES DE PRESIÓN DIFERENCIAL.

El sistema de sensado del prototipo estará constituido por sensores de presión diferencial escogidos para esta aplicación.

Se los ubica de manera que se pueda obtener una señal de voltaje variable, de acuerdo a como varía la presión atmosférica con la presión interna del dirigible (Presión Diferencial).

Los sensores escogidos dan un rango de variación de 0 a 1 psi de presión diferencial, con una salida de voltaje de 1 a 6 voltios, por lo que se debe realizar una etapa de acondicionamiento, para poder ingresar la señal al microprocesador.

El sensor será interconectado al interior del envoltente del dirigible, para ello se emplea una manguera flexible, pero que conserve su forma cilíndrica, para evitar que por el movimiento de la nave pueda ocasionar dobleces en su forma y evitar el paso de la presión sensada. El otro ducto sirve para medir la presión atmosférica. En la Figura 2.3 se muestra el sensor seleccionado.

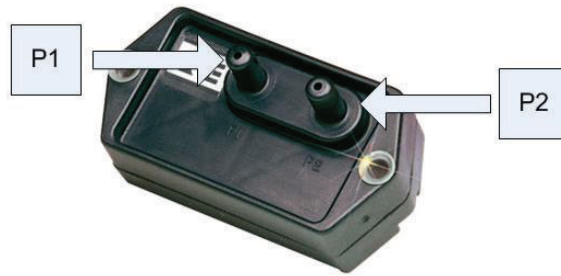


Figura 2.3 Sensor de presión diferencial, P1 mide la presión atmosférica y P2 la presión interna del dirigible.

El sensor seleccionado es utilizado en aplicaciones industriales y se puede acoplar a la medición que se necesita realizar, da una señal eléctrica de acuerdo al aumento o disminución de la presión diferencial.

En la Figura 2.4 se visualiza el diagrama de conexión del sensor de presión diferencial.

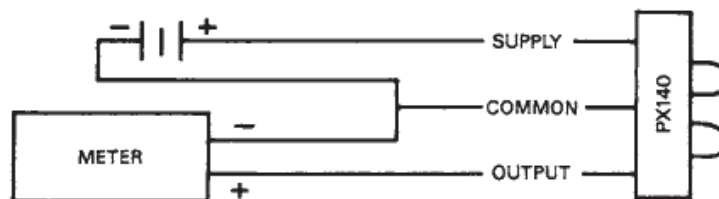


Figura 2.4 Diagrama de conexión del sensor de presión diferencial [7].

Esta variación de presión es la que permite realizar el control automático del ballonet, cuya misión es evitar que el dirigible esté sometido a fuertes o bajas presiones internas, que puedan afectar su forma aerodinámica. Se debe tomar en cuenta que la presión interna del dirigible siempre será un poco mayor a la externa, para conservar su forma, esto es el principio básico en un dirigible no rígido.

2.4.1 SENSADO DEL PROTOTIPO

Las señales de entrada que recibe el microprocesador para realizar una correcta conversión Análoga/Digital, pueden variar en un rango de 0 a 3V, por lo tanto se debe realizar un acondicionamiento de los sensores de presión diferencial, para proteger los conversores análogo-digitales.

En éste caso se emplean sensores de presión diferencial, cuyo rango de medición es de 0 a 1PSI, cuya salida es una señal de voltaje que varía entre 1 y 6 voltios, por lo que se debe acondicionar para que dé una señal de 0 a 3 voltios, para así poder ingresarla al microprocesador. Para realizar las mediciones de presión basta con utilizar un solo sensor, ya que la presión interna es la misma en todos los puntos de dirigible.

2.4.1.1 Acondicionamiento de los sensores de presión diferencial

Para realizar el acondicionamiento de los sensores de presión diferencial, lo que primero se debe tener en cuenta es el rango de ingreso de voltaje al conversor análogo digital del microprocesador, el cual, en este caso es de 0 a 3V. Entonces, para llegar a tener la señal del sensor dentro de los límites requeridos, se debe realizar un acondicionamiento y desacoplamiento de impedancias. Para esto, se utiliza un amplificador de instrumentación en modo diferencial y un divisor de voltaje.

Lo que primero se hace es ingresar la señal del sensor por la entrada diferencial positiva del amplificador y por la entrada negativa se coloca un voltio. El amplificador tiene ganancia unitaria. Con esto se logra tener una señal de 0 a 5 voltios en lugar de la señal de 1 a 6 voltios que da el sensor.

Luego se construye un divisor de voltaje que convierta la señal de 0 a 5 voltios a una que tenga un rango de variación entre 0 y 3 voltios.

Como la ganancia del amplificador de instrumentación es 1, no se afecta a la señal que envía el sensor. Finalmente se obtiene una señal con un rango de variación de 0 a 3V, que se encuentra dentro de los límites permitidos para realizar la conversión AD del DSPIC, la cual es ingresada por el pin RB7. En la Figura 2.5 se muestra el circuito descrito.

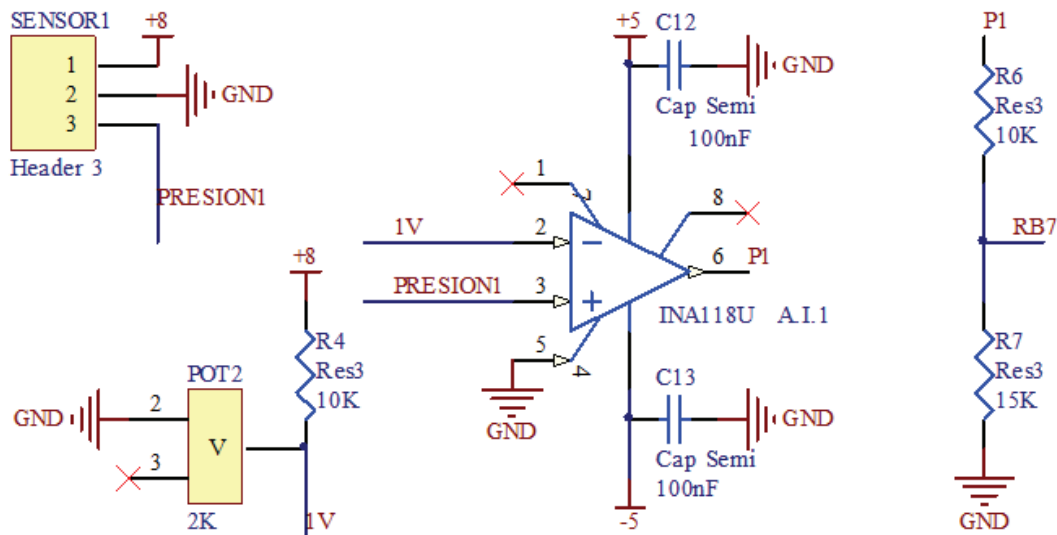


Figura 2.5 Circuito de acondicionamiento del sensor de presión diferencial.

Después de realizar este acondicionamiento, se tiene una señal que varía de 0 a 3 voltios como máximo, estos valores ingresan al microcontrolador para su procesamiento y digitalización.

El amplificador de instrumentación utilizado es el circuito integrado INA118, que es un elemento de buenas características y que sirve para acondicionar la señal, evitar el ingreso de excesivo ruido y poder realizar un desacoplamiento de impedancias. Posee una resistencia R_G que permite manipular la ganancia.

En la Figura 2.6 se muestra el circuito.

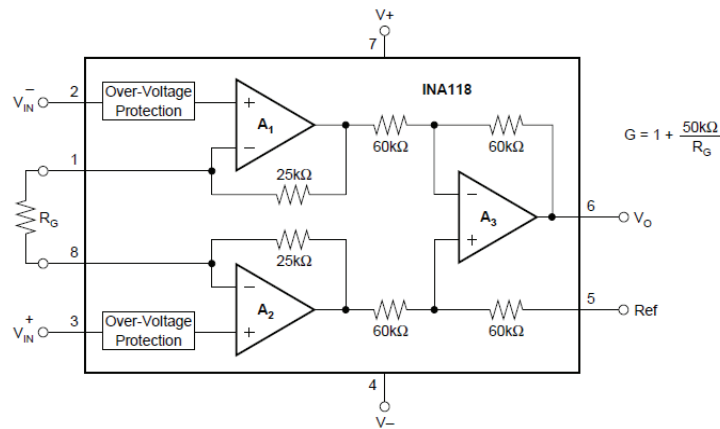


Figura 2.6 Diagrama circuital interior del amplificador de instrumentación INA118 [8].

Como se desea tener una ganancia igual a uno, el fabricante recomienda no conectar ninguna resistencia en los terminales 1 y 8, por lo tanto la resistencia R_G para este caso será infinita.

El divisor de voltaje diseñado, al cual ingresa la señal después del amplificador de instrumentación, tiene como entrada una señal que varía de 0 a 5 voltios y tiene una salida que varía entre 0 y 3 voltios.

A continuación se muestra el circuito diseñado, Figura 2.7.

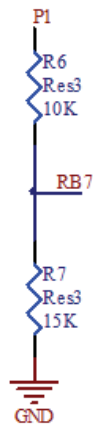


Figura 2.7 Circuito divisor de voltaje colocado a la salida del amplificador de instrumentación.

Para calcular el valor de las resistencias del divisor de voltaje se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R7}{R6+R7} \quad (2.1)$$

En donde $V_{out} = 3V$, $V_{in} = 5V$.

Entonces, si $R6 = 10 \text{ k}\Omega$

$$3V = 5V * \frac{R7}{10\text{k}\Omega + R7} \quad (2.2)$$

Despejando: $R7 = 15 \text{ k}\Omega$.

Estas resistencias tienen la menor tolerancia posible, en este caso se utilizan resistencias de $10 \text{ k}\Omega$ y de $15 \text{ k}\Omega$ de precisión, para tener un divisor de voltaje lo más exacto posible.

Para obtener el voltaje que ingresa por la entrada diferencial negativa del amplificador, que en este caso es de un voltio, se diseña un divisor de voltaje que tiene como entrada 8 voltios y como salida 1 voltio. El circuito descrito se muestra en la Figura 2.8.

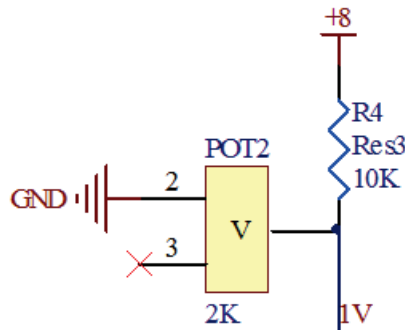


Figura 2.8 Circuito divisor de voltaje del que se obtiene un voltio para la entrada negativa del amplificador de instrumentación.

Para el diseño de este circuito se tiene:

$$V_{out} = V_{in} * \frac{POT2}{R4+POT2} \quad (2.3)$$

En donde $V_{out} = 1V$, $V_{in} = 8V$.

Entonces, si $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$.

$$1V = 8V * \frac{POT2}{10k\Omega + POT2} \quad (2.4)$$

Despejando: $POT2 = 1.428 \text{ k}\Omega$, que en este caso no es un valor estándar, por lo cual se utiliza un potenciómetro de precisión de $2 \text{ k}\Omega$.

Finalmente, después de todo el acondicionamiento, la señal que da el sensor, se ingresa por la entrada analógica RB7 del DSPIC, para que después de ser procesada y digitalizada sea utilizada para realizar el algoritmo de control del sistema.

2.4.1.2 Diseño de Fuentes

Todo el sistema de control se lo polariza utilizando una batería LiPo de 11.1V de una capacidad de 2200 mA por hora, de donde se tiene la energía para las fuentes de los circuitos integrados y el DSPIC.

Como se explicó en el numeral anterior se necesita realizar un acondicionamiento de la señal que dan los sensores de presión. Para ello se opta por un amplificador de instrumentación en base al circuito integrado INA118 que utiliza 2 fuentes, la una de +5 voltios y la otra de -5 voltios.

Las fuentes se las construye con los reguladores de voltaje LM1117-5.0 para la fuente de +5V y con el circuito integrado ICL7662EBA para la fuente de -5V.

En las Figuras 2.9 y 2.10 se muestran los circuitos diseñados.

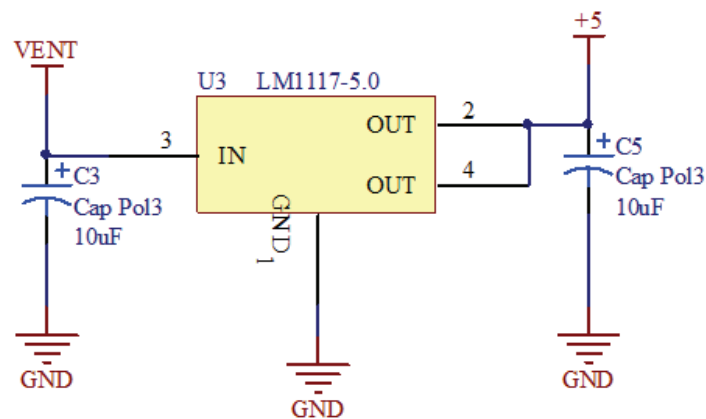


Figura 2.9 Fuente de +5V en base el circuito integrado LM1117-5.0.

Este diseño se basa en un voltaje de entrada VENT, que proviene de la batería de 11.1V. La señal de voltaje VENT ingresa al circuito integrado LM1117-5.0 por el pin número 3, en el cual se coloca un capacitor electrolítico de 10µF. El pin 1 se conecta a tierra y el pin 2 y 4 será la salida de +5V, en la cual también se coloca un capacitor electrolítico de 10µF, para disminuir al máximo cualquier rizado de voltaje. Cabe señalar que este diseño es el que recomienda el fabricante del circuito integrado.

Para obtener la fuente de -5V se utiliza el circuito integrado ICL7662EBA, que es un convertidor de voltaje, en el cual se ingresa el valor de +5V procedente de la fuente anteriormente diseñada, y mediante un arreglo de capacitores, C8 conectado en los pines 2 y 4, y el otro C9 colocado a la salida (VOUT) con polarización inversa. De esta manera se obtienen los -5V que se requieren. Los capacitores son electrolíticos de 10µF de capacitancia.

Los pines 3 y 6 van conectados a GND, el pin 6 de acuerdo a la recomendación del fabricante debe ir conectado a GND sólo cuando se tienen voltajes de entrada menores a 8 voltios.

Los pines 1 y 7 no se conectan.

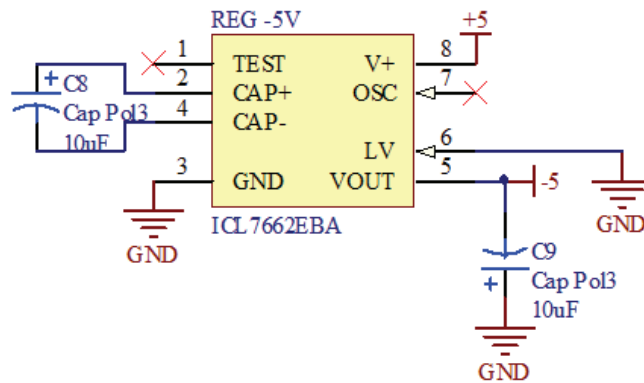


Figura 2.10 Fuente de -5V en base el circuito integrado ICL7662EBA.

Para el diseño de la fuente de 8V, que requiere el sensor de presión diferencial, se utiliza el circuito integrado LM317T, el cual es un regulador de voltaje variable, que mediante un arreglo de resistencias, puede entregar una salida regulada de 8 voltios. En la Figura 2.11 se visualiza la conexión y distribución de pines del circuito integrado LM317T.

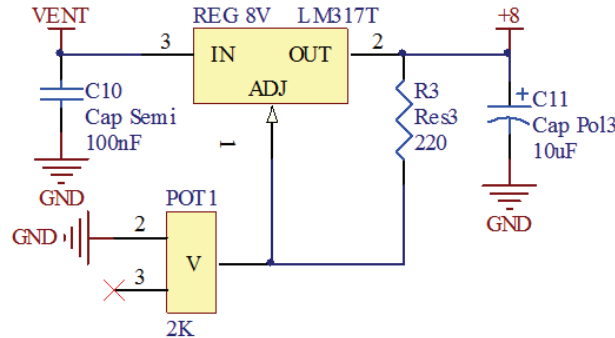


Figura 2.11 Fuente de 8V en base el circuito integrado LM317T.

El voltaje de entrada al circuito integrado es VENT, el cual ingresa por el pin número 3, donde se coloca un capacitor cerámico de 100nF y un capacitor electrolítico de 10uF ubicado en la salida (pin número 2), para que exista el menor rizado posible. El pin número 1 es el terminal de ajuste, en donde se conecta el arreglo de resistencias, y mediante la manipulación del potenciómetro se puede variar el voltaje de salida.

Para dimensionar el valor de las resistencias se utiliza la siguiente fórmula [9]:

$$V_{out} = V_{REF} \left(1 + \frac{POT1}{R3} \right) + I_{ADJ} * POT1 \quad (2.5)$$

En donde, $V_{out} = 8V$, el voltaje de referencia V_{REF} es el valor que se tiene entre el terminal de ajuste y el terminal de salida del regulador que siempre es igual a 1.25V [9].

La I_{ADJ} es una corriente muy pequeña y se puede aproximar el término $I_{ADJ} * POT1$ igual a cero.

Ahora, si $R3 = 220 \Omega$ se tiene:

$$8V = 1.25V * \left(1 + \frac{POT1}{220\Omega} \right) \quad (2.6)$$

Por lo tanto $POT1 = 1.188 k\Omega$, el cual no es valor estándar de resistencia, por lo que se utiliza un potenciómetro de precisión de $2 k\Omega$ para lograr obtener un voltaje exacto de 8V.

Finalmente, se requiere diseñar la fuente del DSPIC y del módulo transmisor de datos inalámbrico. Ambos dispositivos funcionan con una fuente de 3.3 V, para lo cual se utiliza el circuito integrado LM1117-3.3 para obtener dicho valor de voltaje.

Al igual que el regulador LM1117-5.0 se colocan dos capacitores electrolíticos de 10uF, el uno ubicado en la entrada de la señal de voltaje por el pin número 3 y el otro en la salida del circuito integrado (pin 2 y 4). El pin número 1 va conectado a GND. Se debe notar que como voltaje de entrada se tiene +5V que viene de la fuente anteriormente diseñada, esto debido a que este circuito integrado permite, como voltaje de entrada un valor máximo de 7 voltios y por lo tanto no podría ser VENT.

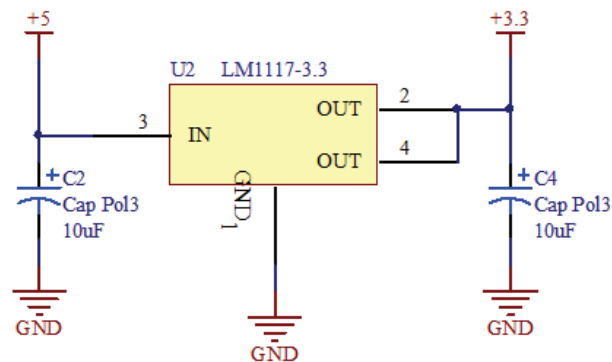


Figura 2.12 Fuente de 3.3V en base el circuito integrado LM1117-3.3.

2.5 SISTEMA DE ACTUADORES DEL PROTOTIPO

El sistema de actuadores del prototipo está constituido por una válvula, para el ingreso y salida del aire, y de un motor BLDC con inversión de giro, que sirve como bomba para ingresar o sacar el aire del ballonet. La válvula se construye en fibra de carbono y tiene un sistema mecánico accionado por un servomotor, que permite abrir y cerrar la válvula cuando sea necesario.

Se opta por la idea de construir la válvula, después de realizar una amplia búsqueda de una de tipo comercial, y al encontrar válvulas extremadamente pesadas se decide construirla bajo un diseño mecánico, al cual se acopla el sistema electrónico de control y sobretodo que sea liviano.

Este diseño de válvula se construye debido a que se necesita que sea lo suficientemente liviana, para que el dirigible la levante, ya que se debe tener en cuenta que el peso es el más grande inconveniente para los dirigibles.

De la misma manera que se debe tener en cuenta el peso de la válvula, se debe tener muy en cuenta el peso del motor, que sirve como ventilador o extractor de aire. Por ello se utiliza un motor BLDC que es muy difundido en aeromodelismo como motor de propulsión, el cual al ser acoplado a un ducto, da un flujo de aire similar al que da un sistema de ventilación.

2.5.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA VÁLVULA

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.

2.5.1.1 Sistema electrónico y mecánico de la válvula

Como se explicó, la válvula posee dos sistemas que permiten su accionamiento, el primero que es un sistema electrónico que acciona un servomotor y el segundo es el sistema mecánico constituido por un brazo metálico acoplado al servomotor, para la manipulación de la tapa y de resortes que ayudan en el cerrado de la válvula.

El servomotor es un dispositivo ampliamente utilizado en robótica, ya que permite tener un gran torque y sobre todo que se lo puede manejar con señales PWM, que en este caso son generadas por el DSPIC. Se lo puede configurar para que mueva el ángulo que requiera el sistema mecánico, en este caso se le ha dado un rango de movimiento circular de 180 grados. En la figura 2.13 se visualiza el diagrama de bloques de funcionamiento de un servomotor.

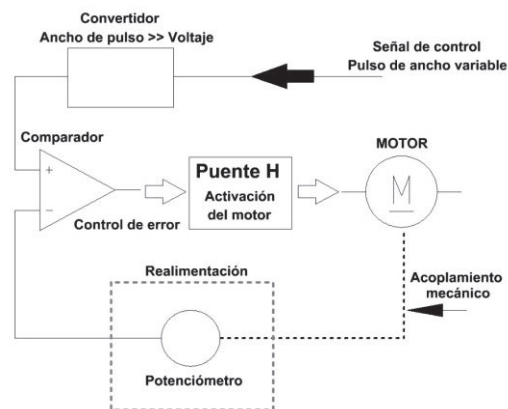


Figura 2.13 Diagrama de bloques del funcionamiento de un servomotor.

Además como característica fundamental, es un dispositivo liviano, lo cual es fundamental en el sistema. En la Figura 2.14 se observa la figura de un servomotor comercial.



Figura 2.14 Servomotor Comercial.

La parte mecánica de la válvula está construida de material liviano pero resistente, en este caso de fibra de vidrio reforzada y diseñada para lograr un accionamiento, mediante un brazo mecánico que es movido por el servomotor. Este sistema como se explicó tiene guías que permiten al tapón de la válvula encarrilarse, y además contiene resortes que le ayudan a sellar lo mejor posible, para evitar de esta manera, tener fugas del aire que ingresa al ballonet.

En la Figura 2.15 se puede observar la compuerta que se acciona mediante un brazo conectado al servomotor, el estado original de la válvula es normalmente cerrado, por lo que el accionamiento por el servomotor se lo utiliza en la apertura. Para el cierre y regreso a la posición inicial se utiliza el servomotor y los resortes que ayudan para un mejor sellado y así poder evitar fugas.

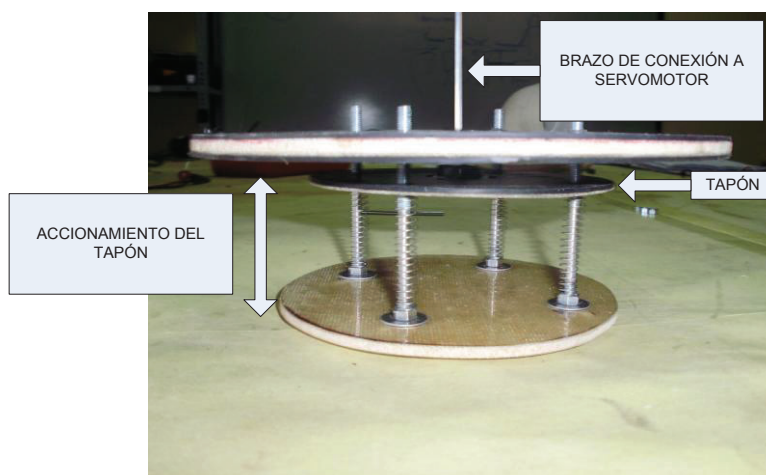


Figura 2.15 Vista interior de la válvula.

En la figura 2.16 se puede ver la válvula totalmente armada, el cable de conexión del servomotor que es manejado por el microprocesador posee tres conectores, uno para polarización, el otro GND y un tercero para la señal PWM.

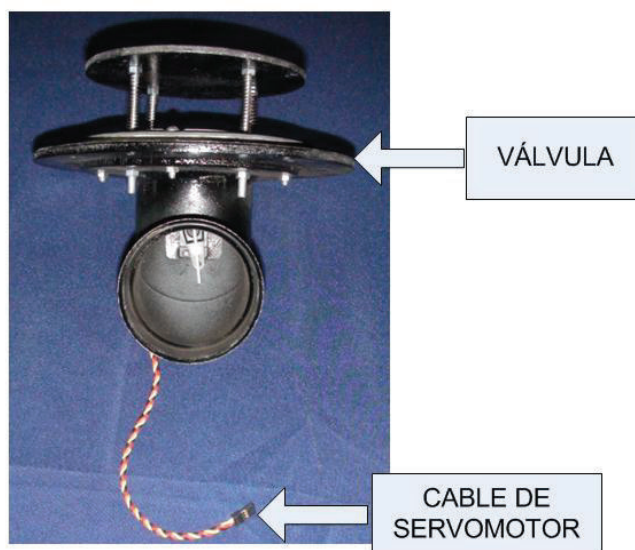


Figura 2.16 Válvula del sistema de ingreso de aire al ballonnet.

El servomotor se maneja por la señal de control que envía el DSPIC y para alimentarlo se utiliza una batería de 4.8 v de 2200 mA por hora. Esta batería proporciona la corriente necesaria que requiere el servomotor para mover el tapón en la apertura y cierre de la válvula. En la Figura 2.17 se tiene una batería utilizada en aeromodelos para activación de los servomotores.



Figura 2.17 Batería para polarización del servomotor.

2.5.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL VENTILADOR

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 acoplar todo el sistema al envoltente del dirigible e interiormente conectarse al ballonet.

La Figura 2.18 muestra el motor acoplado a la tubería. Se puede ver los tres conectores del motor que van conectados al inversor de velocidad y en la Figura 2.19 se puede ver un diagrama de bloques de conexión del motor con el controlador de velocidad y la batería LiPo.

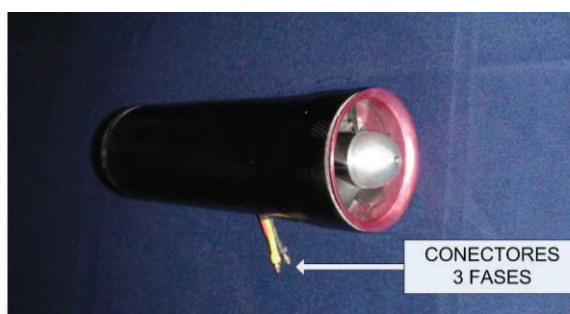


Figura 2.18 Bomba de aire.

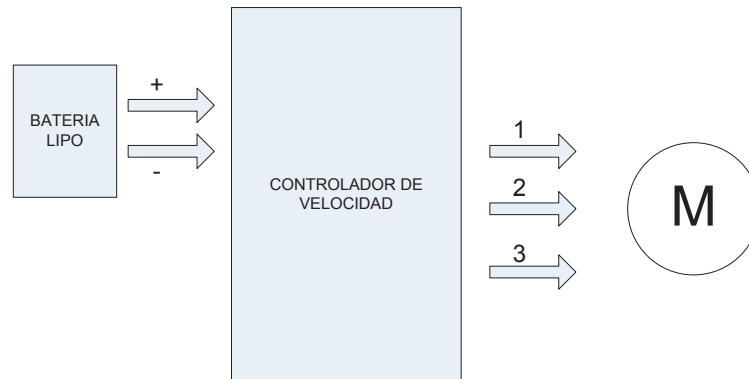


Figura 2.19 Diagrama de bloques de conexión del motor al controlador de velocidad.

Finalmente se puede ver el acoplamiento entre la válvula y el motor mediante un codo de 90 grados, que constituyen todo el sistema para poder manipular el ingreso o la salida del aire del ballonet. Las baterías de alimentación para el servomotor y para el motor van montadas en la góndola de la nave. La batería del motor alimenta también al controlador de velocidad y para su activación posee un switch de encendido y apagado. Para alimentación del circuito de control se utiliza una batería LiPo de 11.1 V, que igualmente va incorporada en la góndola. En la figura 2.20 se visualiza el acoplamiento de la válvula y el motor BLDC.



Figura 2.20 Válvula y bomba de aire.

2.6 COMUNICACIÓN INALÁMBRICA PARA MONITOREO DEL PROTOTIPO

Toda la información de los sensores y las variables, para manejar los actuadores, es transmitida desde el dirigible a tierra y visualizada en una interfase gráfica en el lenguaje de programación LABVIEW, cuyo diseño se explica en el capítulo 3, numeral 3.3.1.

Para la realización de la transmisión de datos, se diseña la placa con el módulo de transmisión XBEE y además se tiene un conector DB9 de comunicación serial, el cual permite conectar el sistema de control de ballonets al módulo de comunicaciones del prototipo final, el cual es capaz de transportar más peso.

En este caso para la transmisión de la información se utilizan los módulos de comunicación inalámbrica XBEE. Esto debido a que el prototipo empleado para las pruebas no tiene la capacidad de levantar mucho peso.

El módulo de comunicación XBEE es un sistema de comunicación inalámbrica que tiene un gran alcance, aproximadamente 1 kilómetro. Para poder verificar la funcionalidad del sistema se procede a utilizar estos módulos, y en el futuro para poder llegar a mayores alturas se utilizarán radios con amplificadores y antenas dedicadas para la aplicación.

Entre las principales características de este dispositivo se tiene **[10]**:

- Alcance sin línea de vista alrededor de 100m
- Alcance con línea de vista hasta 1500m
- Poder de transmisión 100mW (20 dBm)
- Sensibilidad de Recepción -100 dBm
- Corriente de Transmisión TX 270 mA (a 3.3V)
- Corriente de Recepción RX 55mA (a 3.3V)
- Tasa de transferencia de datos RF 250.000bps

En la Figura 2.21 se puede ver el módulo XBEE, el cual es un dispositivo liviano, pequeño y de bajo consumo que se acopla con el sistema que se construye. El sistema está compuesto por 2 módulos XBEE, uno de ellos está conectado a la tarjeta de control que se la incorpora al dirigible y el otro módulo está conectado mediante comunicación serial con la PC en la estación base de monitoreo y control.



Figura 2.21 Módulo de comunicación XBEE.

La configuración de los parámetros principales de este dispositivo se explica en el capítulo 3, numeral 3.4.

Para la conexión del XBEE al DSPIC se utiliza 4 pines, la distribución de los pines se puede ver en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Distribución de pines del Módulo XBEE.

Nº de Pin	Función
1	VCC (3.3V)
2	DATA OUT
3	DATA IN
10	GND

Mediante la conexión de estos cuatro pines, se realiza la comunicación entre el DSPIC con el XBEE transmisor y de ahí se llevan los datos a la estación en tierra, donde se halla el otro XBEE configurado, el cual recibe los datos y los transmite mediante un puerto COM hacia el computador.

En la Figura 2.22 se muestra el diagrama de bloques de la constitución interna del módulo XBEE.

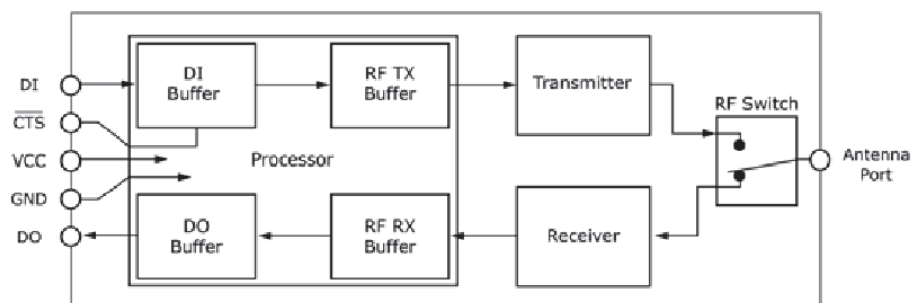


Figura 2.22 Diagrama de bloques de la constitución interna del módulo de comunicación XBEE.

La distribución de pines y conexión del módulo XBEE al DSPIC se visualiza en la Figura 2.23.

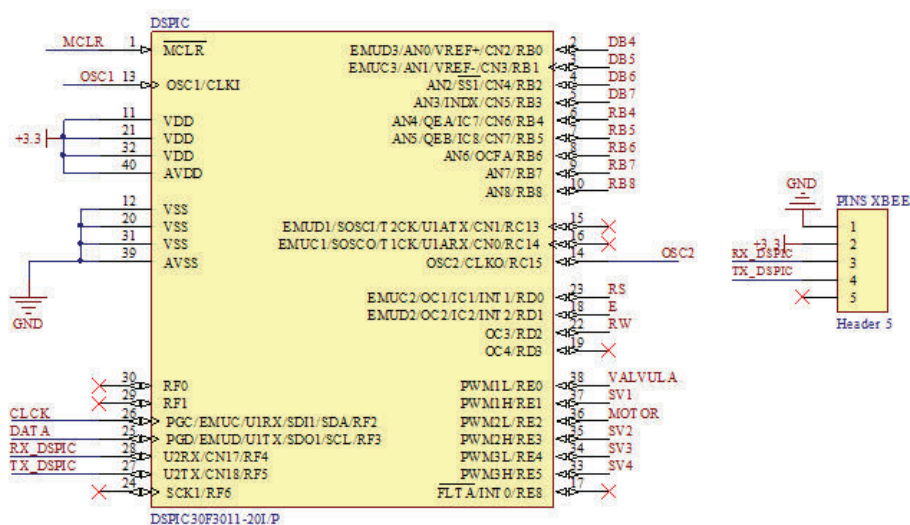


Figura 2.23 Conexión del DSPIC con el módulo de comunicación XBEE.

La conexión del módulo XBEE base al computador se lo realiza mediante un cable de conexión USB-SERIAL.

Se configura la velocidad de transmisión con la computadora, el número del puerto COM que se utiliza y finalmente se pueden visualizar la trama de datos que envía el

DSPIC a la computadora y viceversa. La Figura 2.24 muestra la conexión del dispositivo.

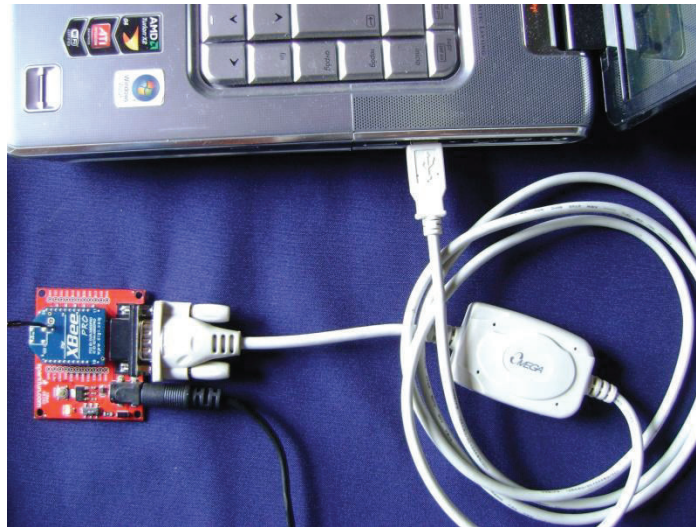


Figura 2.24 Conexión del modulo de comunicación XBEE base a la PC.

2.7 DISEÑO DE LA PLACA DE CONTROL

La placa de control se diseña mediante el software de diseño electrónico ALTIUM DESIGNER, en el que se tiene las herramientas necesarias para poder diseñar una placa que se ajuste a las necesidades del prototipo.

Se la diseña de manera que se pueda acoplar los sensores de manera fácil, así como los actuadores. Posee un LCD, en donde se verifica el estado del sistema, y además posee la opción de poder programar el DSPIC, en caso de requerirlo y sin necesidad de retirarlo de la placa.

Los elementos que intervienen en el circuito de control están distribuidos a ambos lados de la placa, para poder aprovechar el espacio y disponer de mejor manera los elementos que intervienen.

Las señales de los sensores, así como las señales para los actuadores, son transmitidas a través de arneses construidos y muy bien colocados, para que no

existan posibles fallas por desconexión. En la Figura 2.25 se puede ver un lado de la placa diseñada, se pueden ver los elementos superficiales [11] colocados, así como la ubicación del DSPIC y los pines de conexión para los sensores, actuadores y el XBEE.

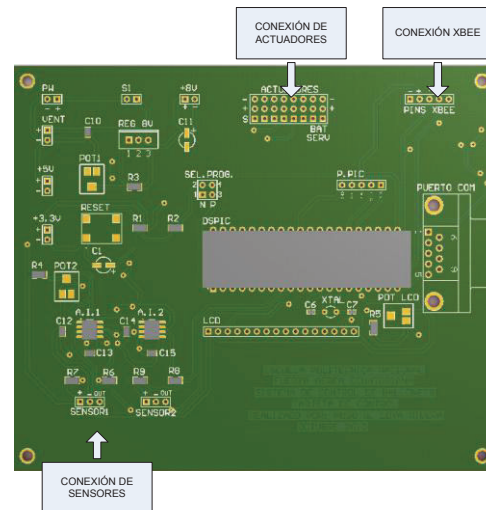


Figura 2.25 Placa diseñada en ALTIUM DESIGNER.

Como se explicó antes, la unidad principal de procesamiento de las señales y de control es el DSPIC30F3011, que se encuentra sobre un zócalo soldado a la placa, el cual fácilmente puede ser removido en caso de necesitar ser reemplazado. Todos los elementos de acondicionamiento y pines de entrada y salida se encuentran colocados en la superficie de ambos lados de la placa.

2.7.1 CARACTERÍSTICAS DEL MICROPROCESADOR DSPIC30F3011

Para la construcción de este prototipo se escoge el micro controlador híbrido (CPU y DSP) dsPIC30F3011, que tiene muy buenas características como buen procesador de señales (DSP), una gran velocidad de su módulo convertor AD, que en este caso, es de hasta 500000 muestras/segundo y además que tiene salidas para manejo de motores por medio de señales PWM generadas, lo cual permite manejar el servomotor de accionamiento de la válvula y el controlador de velocidad [12].

La arquitectura y características básicas del DSPIC, se resumen a continuación:

- **Arquitectura CPU**

- Arquitectura de Harvard modificada.
- Datos de 16 bits.
- Instrucciones de 24 bits.
- 24 Kbytes de espacio en memoria Flash de programa (8 Kbytes de palabras de instrucción).
- 1 Kbyte de memoria RAM.
- 1 Kbyte de memoria EEPROM (no volátil)
- Arreglo de registros de 16x16 bits.
- Operación de hasta 30 MIPS (mega-instrucciones por segundo).
- 29 fuentes de interrupción
 - 3 fuentes de interrupción externa
 - 8 niveles de prioridad, seleccionables para cada fuente de interrupción.
 - 4 fuentes de trampa de procesador.

- **Arquitectura DSP**

- Extracción de datos dual.
- Sobre escritura de acumulador para operaciones DSP.
- Modo de direccionamiento de módulo y de bit reservado.
- Dos acumuladores de 40 bits de ancho, con saturación lógica opcional.
- Multiplicador-integrador de 17 bits x 17 bits de ciclo simple.
- Todas las instrucciones DSP se hacen en un solo ciclo.

El microprocesador es la unidad que se encarga de realizar todo el control y la adquisición de datos de los sensores, así como también de la comunicación con el XBEE. En la Figura 2.26 se muestra la distribución de los pines de acuerdo a lo que se necesita en el sistema.

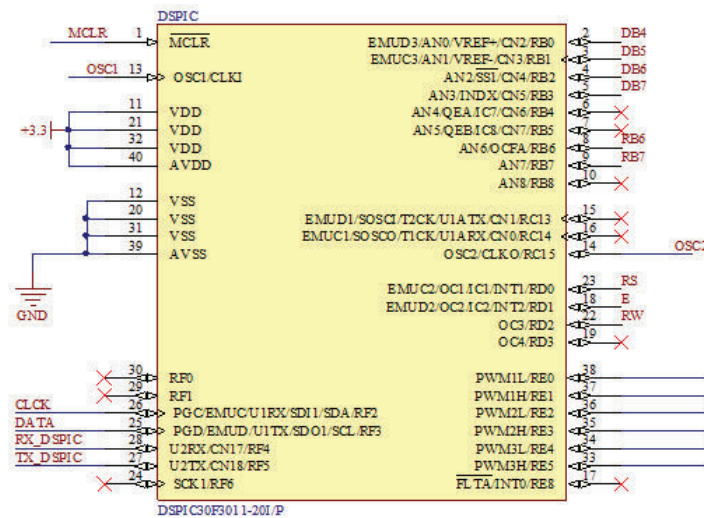


Figura 2.26 Esquema del DSPIC30F3011 con su respectiva distribución de pines.

De los pines 33 al 38 se tiene las salidas PWM para el manejo del controlador del motor y del servomotor para el accionamiento de la válvula. Estas señales son transmitidas a través de un bus de datos hacia donde se encuentran los dispositivos anteriormente mencionados.

El funcionamiento del controlador de velocidad es similar al de un servomotor, es decir se manejan por intervalos de tiempo. Se explica en el numeral 2.8.2.

2.7.2 LCD DE VISUALIZACIÓN DE PARÁMETROS

Para la visualización de los datos de los sensores y del modo de funcionamiento del sistema, se tiene un LCD de 2 filas y 16 columnas, que se encuentra en la placa de control. En la Figura 2.27 se muestra el LCD incorporado a la placa de control y su visualización de parámetros.

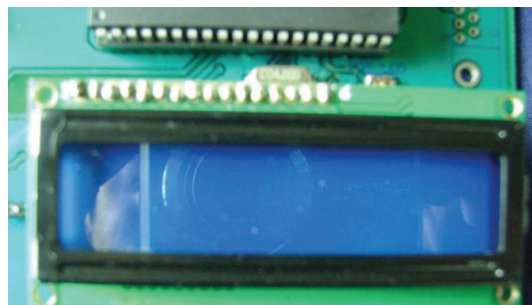


Figura 2.27 LCD 2 filas y 16 columnas, se muestra la visualización de los parámetros.

Para la conexión del LCD al DSPIC se utilizan los pines 2, 3, 4, 5 para los datos, el pin 23 es RS, el pin 18 es E y el pin 22 es RW.

La distribución de pines para realizar la conexión del LCD al DSPIC se visualiza en la Figura 2.28

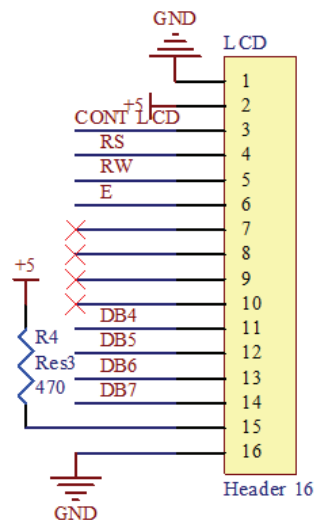


Figura 2.28 Distribución de pines y conexión del LCD 2X16.

2.8 CONEXIÓN DE LOS ACTUADORES

El funcionamiento del controlador de velocidad y del servomotor, es a través de la variación de los tiempos en las señales PWM que envía el DSPIC.

El controlador de velocidad es básicamente un convertor DC-AC, que transforma el voltaje de una batería DC a un voltaje AC trifásico y cuyo funcionamiento se explica en el numeral 2.8.2.

2.8.1 CONEXIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SERVOMOTOR

2.8.1.1 Servomotor [13].

Un Servo es un dispositivo pequeño que tiene un eje de rendimiento controlado. Este puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada.

Con tal de que una señal codificada exista en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje. Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia.

En la práctica, se usan servos para posicionar superficies de control, como el movimiento de palancas, pequeños ascensores y timones. Ellos también se usan en radio control, títeres, y por supuesto en robots.

Los servos son sumamente útiles en robótica. Los motores son pequeños, tiene internamente una circuitería de control interna y es sumamente poderoso para su tamaño. El torque es bastante fuerte para su tamaño. Un servo, por consiguiente, no consume mucha energía. En la Figura 2.29 se muestra la composición interna de un servomotor. Se puede observar la circuitería de control, el motor, un juego de piñones y la caja.

También se visualiza los 3 alambres de conexión externa. Uno es para alimentación Vcc (+5volts), conexión a tierra GND y el alambre blanco es para el control.

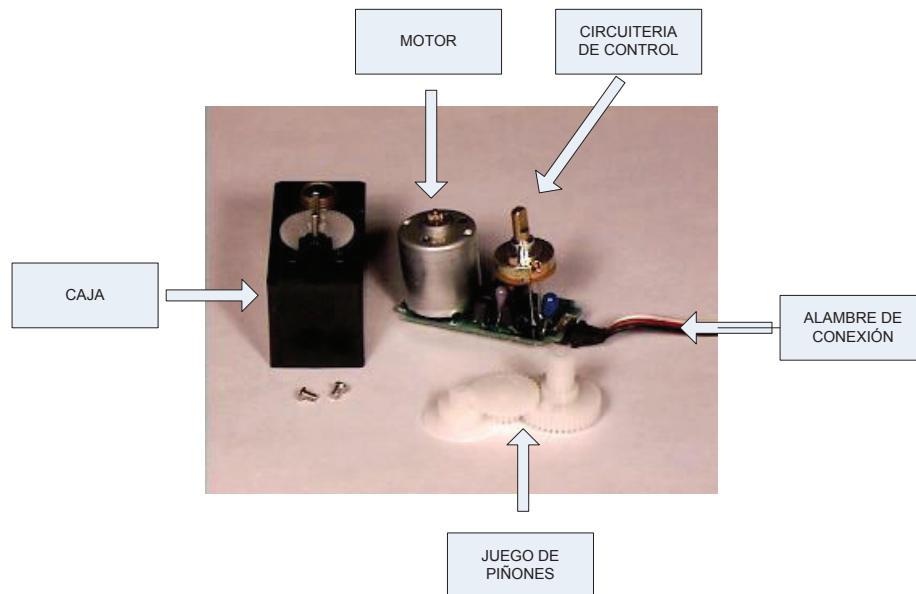


Figura 2.29 Servomotor desmontado.

2.8.1.2 Funcionamiento del servomotor

El motor del servo tiene algunos circuitos de control y un potenciómetro (una resistencia variable) que se conecta al eje central del servomotor. Este potenciómetro permite a la circuitería de control, supervisar el ángulo actual del servomotor. Si el eje está en el ángulo correcto, entonces el motor está apagado. Si el circuito chequea que el ángulo no es el correcto, el motor gira en la dirección adecuada hasta llegar al ángulo correcto. El eje del servo es capaz de llegar alrededor de los 180 grados.

Normalmente, en algunos llega a los 210 grados, pero varía según el fabricante. Un servo normal se usa para controlar un movimiento angular de entre 0 y 180 grados. Un servo normal no es mecánicamente capaz de retornar a su lugar, si hay un mayor peso que el sugerido por las especificaciones del fabricante.

La cantidad de voltaje aplicado al motor es proporcional a la distancia que éste necesita viajar. Así, si el eje necesita regresar una distancia grande, el motor regresará a toda velocidad. Si éste necesita regresar sólo una pequeña cantidad, el motor correrá a una velocidad más lenta. A esto se le llama control proporcional.

El cable de control se usa para comunicar el ángulo. El ángulo está determinado por la duración de un pulso que se aplica al conector de control. A esto se le llama PCM Modulación Codificada de Pulsos. El servo espera ver un pulso cada 20 milisegundos (.02 segundos). La longitud del pulso determina los giros de motor. Un pulso de 1.5 ms., por ejemplo, hará que el motor se torne a la posición de 90 grados (llamado la posición neutra). Si el pulso es menor de 1.5 ms., entonces el motor se acercará a los 0 grados. Si el pulso es mayor de 1.5ms, el eje se acercará a los 180 grados.

Como se observa en la Figura 2.30, la duración del pulso indica o dictamina el ángulo del eje (mostrado como un círculo verde con flecha). Nótese que las ilustraciones y los tiempos reales dependen del fabricante de motor. El principio, sin embargo, es el mismo.

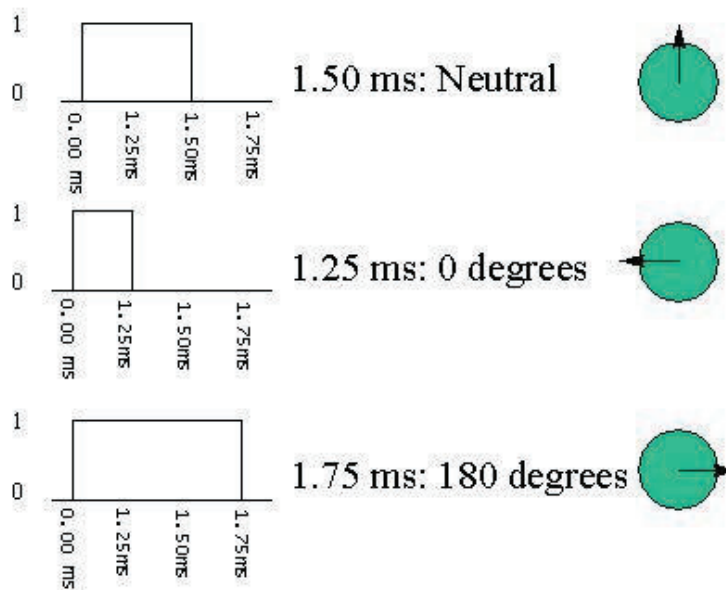


Figura 2.30 Funcionamiento de un servomotor.

El servomotor usado en la construcción de la válvula es del fabricante Hitec y los rangos de variación son: 0.50 ms = 0 grados, 1.50 ms = 90 grados y 2.5 ms = 180 grados.

Este servomotor, como se explicó antes, es el que permite accionar el mecanismo de apertura y cerrado de la válvula de control, y para su polarización se conecta una batería de NiMH de 4.8 V, que entrega una corriente de 2200mAh. Esta batería debe dar la corriente necesaria cuando el servomotor esté sometido al torque que necesita para abrir la válvula.

2.8.2 CONEXIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR DE VELOCIDAD PARA EL MOTOR

El controlador de velocidad escogido se utiliza en aplicaciones de competencias de autos eléctricos pequeños, ya que brindan un buen torque y además permite tener inversión de velocidad.

El funcionamiento es similar al de un servomotor, es decir que dependiendo de la variación de los intervalos de tiempo en cierto rango, se tiene variación de velocidad en un sentido, y en otro rango se tiene inversión con variación de velocidad. También tiene un estado de reposo, donde el motor se mantiene quieto.

Los rangos de tiempo funcionan de acuerdo con la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Rangos de tiempo y función del controlador de velocidad.

Rango de Tiempo (us)	Función
1000 a 1499	Giro horario
1500	Posición Neutral
1501 a 2000	Giro anti horario

En la Figura 2.31 se muestra el controlador de velocidad utilizado. Para cada sentido de giro posee un indicador luminoso, si gira en sentido horario el motor, se presenta el color verde, si en cambio gira en sentido anti horario presenta el color rojo y cuando el motor se encuentra detenido o en la posición neutral presenta el color naranja.

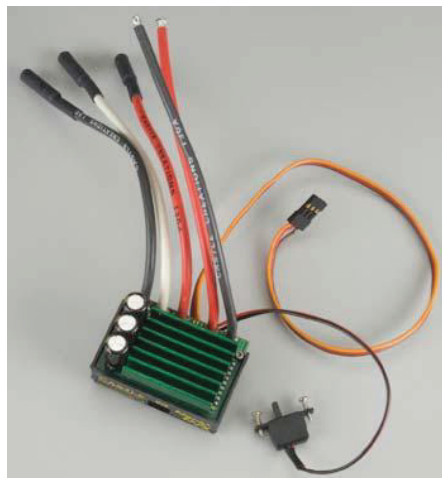


Figura 2.31 Controlador de velocidad.

Este dispositivo puede ser programado de acuerdo a las características eléctricas del motor, para ello se pueden configurar varios parámetros mediante software. En la

figura 2.32 se muestra un diagrama de bloques de la constitución del controlador de velocidad. Mediante la entrada USB se puede acceder al sistema para configurarlo, de acuerdo a las características que posea el motor.

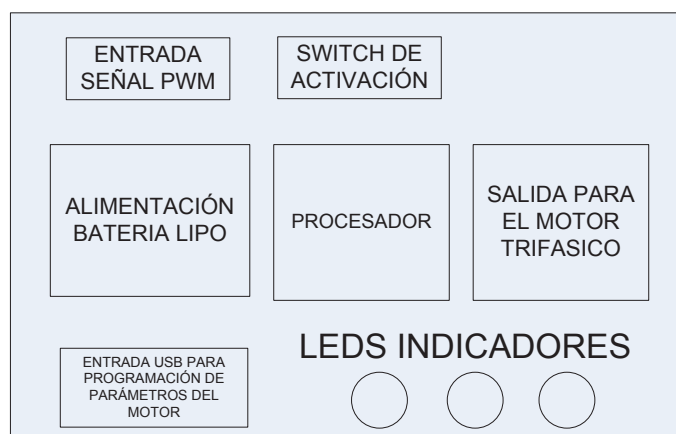


Figura 2.32 Diagrama de bloques de la constitución del controlador de velocidad.

La conexión del motor al controlador de velocidad se realiza como muestra la Figura 2.33.

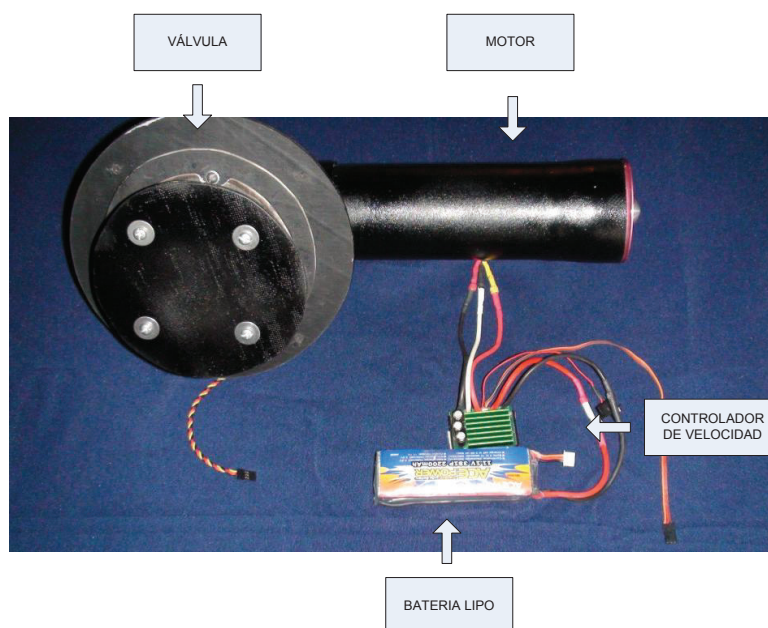


Figura 2.33 Controlador de velocidad conectado al motor BLDC.

Se tiene dos cables de alimentación principal que son la fuente de alimentación para el motor, en la cual se conecta una batería LiPo de 11.1V, 2200mAh y al mismo tiempo permite polarizar el controlador de velocidad.

También posee tres cables que son las 3 fases que se conectaran al motor, que en este caso es trifásico, y además dispone de un switch que permite encender el controlador de velocidad e inicializarlo.

La conexión de la señal de control, que envía el DSPIC, utiliza un cable de 3 conectores similar al de un servomotor, el color rojo es para VCC, el color café es GND y el color naranja es para la señal PWM.

Cuando el switch es colocado en la posición de encendido, el controlador se inicializa y emite un sonido rítmico que permite saber si se inicializó correctamente.

CAPÍTULO 3.

DESARROLLO DE SOFTWARE

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se da una breve explicación del lenguaje de programación mikro_C para dsPIC, usado en la programación del microprocesador, y se describe el programa principal junto a las funciones empleadas en el manejo del dispositivo, además se presenta los diagramas de flujo de cada una de ellas.

También se describe el desarrollo del algoritmo de control, la programación del HMI en la herramienta de programación gráfica LABVIEW, la configuración de los módulos XBEE y de los controladores de velocidad del motor BLDC.

3.2 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN MIKRO_C dsPIC

Para el diseño del algoritmo de control se utiliza la herramienta de software llamada Mikro C para DSPICs, la cual es una herramienta de programación secuencial y de alto nivel que se asemeja al lenguaje C.

Mediante este software se puede desarrollar aplicaciones y proyectos con micro controladores dsPIC30/33 y PIC24 de manera eficiente, ya que ofrece muchas ventajas con respecto al lenguaje ensamblador **[14]**.

Algunas de las ventajas que se puede tener, son por ejemplo:

- Permite escribir el lenguaje en código tipo C de alto nivel.
- Posee librerías que permiten programar de manera ordenada y sin necesidad de ocupar muchas líneas de código.
- Permite monitorear el flujo del programa.

- Posee un explorador de código, en donde se puede monitorear la estructura de desarrollo del programa, las variables y funciones utilizadas.

En la Figura 3.1 se visualiza la ventana de programación del dispositivo en Mikro C, se pueden observar los comandos bien definidos, se tiene el área de programación, a la izquierda se encuentra el explorador de código y la pestaña para escoger el micro controlador a ser programado.

En la parte inferior se tiene la ventana de visualización de errores cuando el programa es compilado.

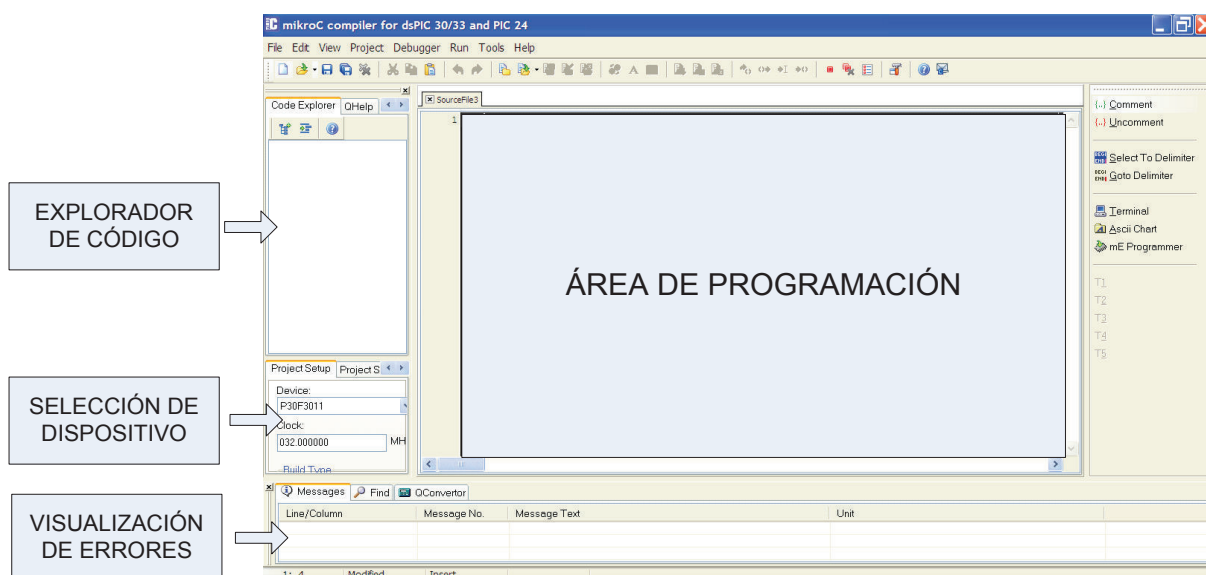


Figura 3.1 Ventana de programación en Mikro C.

Para la creación de un nuevo proyecto se va a seguir 5 pasos que se los detalla a continuación:

En la pestaña Proyecto, se escoge la opción nuevo proyecto, de ahí aparece una ventana de menor tamaño en la que se tiene varias opciones para configurar el dispositivo que se utiliza junto con la velocidad del oscilador, y también para escoger

la ubicación y nombre con el que se guardará el proyecto. En la Figura 3.2 se visualiza la ventana para la creación de un nuevo proyecto en el lenguaje Mikro C.

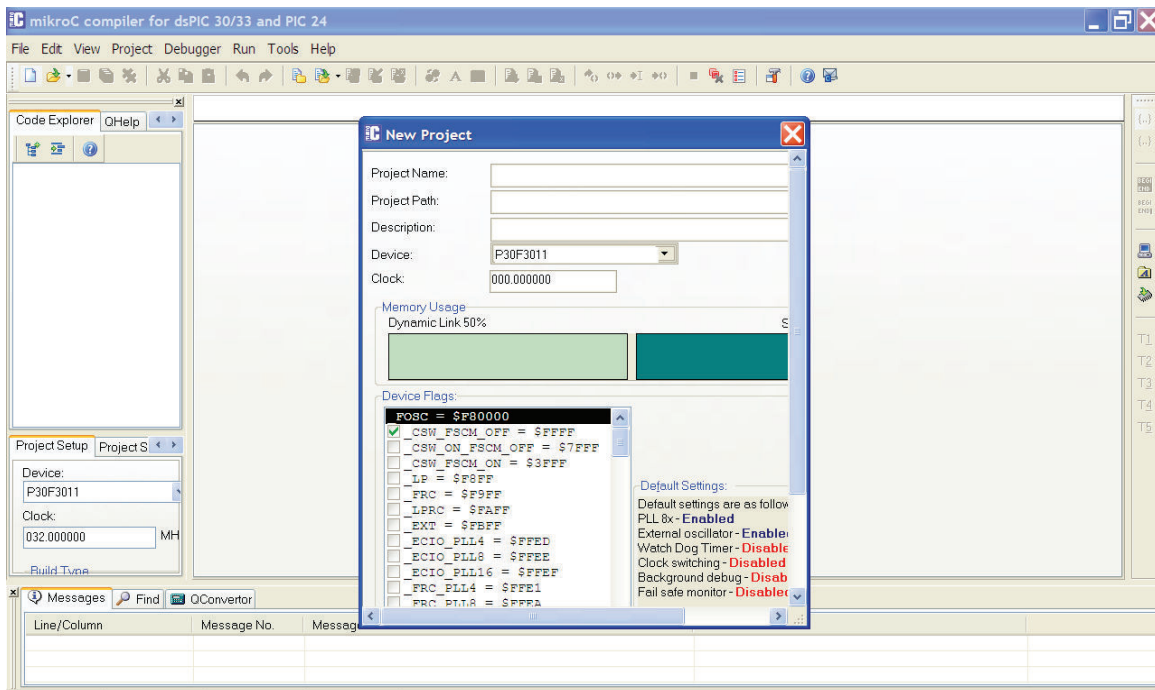


Figura 3.2 Ventana de creación de un nuevo proyecto.

Lo primero que se debe poner es el nombre del proyecto, que sea fácilmente identificable.

Como segundo paso se busca la carpeta en la que se desea guardar el proyecto. Si se desea se puede poner un comentario.

Tercero se indica el dispositivo a utilizar en el proyecto.

Cuarto se escoge la frecuencia del reloj con la que se quiere trabajar.

Finalmente en la opción, opciones del dispositivo, se coloca por defecto y click en OK. Con estos cinco pasos se tiene listo el proyecto para poder trabajar y programar el DSPIC.

Una vez que se ha creado el programa, es necesario compilarlo en un código de programa (.hex). Esto se consigue seleccionando la opción "Build" del menú Proyecto, o también mediante Ctrl+F9.

El fichero .hex es el que se necesita para programar el DSPIC, esto se lo hace mediante el software WinPic800, en el cual se carga el archivo .hex para después grabar el programa al micro controlador. En el programa WinPic800 se debe configurar los parámetros adicionales del DSPIC.

3.2.1 ALGORITMO DE CONTROL

El algoritmo de control, del sistema de control de ballonets, es función de las señales que llegan al microprocesador de todo el sistema. Las señales son:

- Señal del sensor de presión diferencial.
- Comunicación inalámbrica con la PC.

La señal del sensor de presión llega al microprocesador, pero antes pasa a través de una etapa de acondicionamiento. Después que la señal es acondicionada entra por el conversor AD del microcontrolador. Esta señal es la que permite al microcontrolador realizar el algoritmo de control.

Dependiendo del valor de la presión diferencial entran en funcionamiento los actuadores.

El algoritmo de control es un control con histéresis, se utiliza esta técnica debido a que, si se implementara un PID, se tendría mayor consumo del motor, ya que reacciona 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 escoge el modo de funcionamiento mediante un selector en el HMI.

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

3.2.1.1 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 utiliza en tierra para la verificación del funcionamiento del sistema completo. Se puede 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 depende de la situación de la nave y de la decisión que tome el piloto.

3.2.1.2 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 mas 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 realiza algunas pruebas destructivas para 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 aún el globo no sufre daños.

El límite inferior se determina hasta cuando el globo puede mantener su forma aerodinámica. De la misma manera se toma como valor mínimo uno ligeramente mayor, para 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 vuelven a encenderse sino hasta cuando la presión sea mayor nuevamente al 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 3.3 se muestra un gráfico 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 determina mediante pruebas destructivas y análisis aerodinámicos, que el rango de variación del sistema más adecuado esté entre 0.01 y 0.02 PSI de presión diferencial, para proteger de mejor manera el material del envoltente.

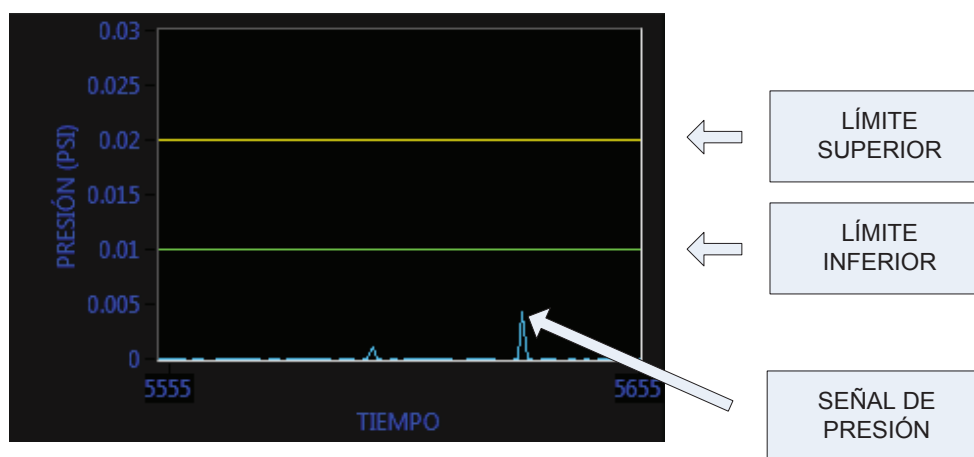


Figura 3.3 Ventana de histéresis del sistema.

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 3.4 resume el funcionamiento del algoritmo de control del sistema de control de ballonets.

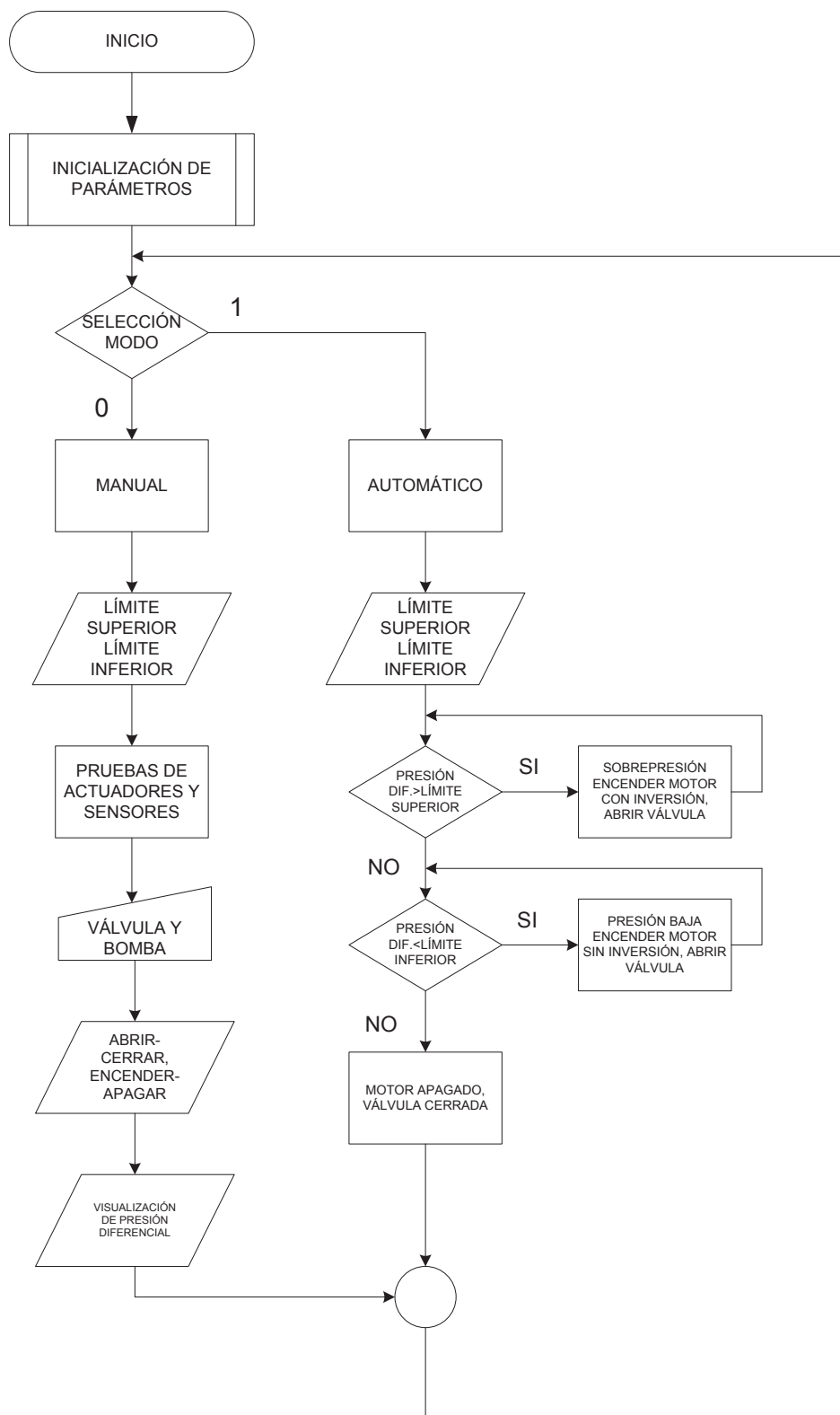


Figura 3.4 Algoritmo de control del sistema de Control de Ballonets.

3.2.2 PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL

Como se mencionó anteriormente, para el desarrollo del sistema de control de ballonets se utiliza un DSPIC 30F3011 cuya distribución de pines y organización interna se muestra en la Figura 3.5.

Las dimensiones de cada uno de los microcontroladores PIC varían dependiendo de los periféricos que éste posea. Se los encuentra en paquetes tipo PDIP (Plastic Dual In Line Package), PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier) y QFP (Quad Flat Package). Para el caso del sistema construido se utiliza un DSPIC30F3011 tipo PDIP.

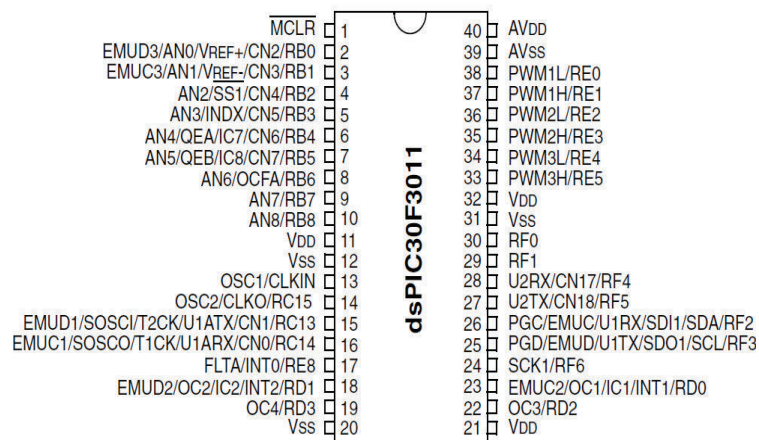


Figura 3.5 Empaquetado microcontrolador DSPIC30F3011 [12].

Puede notarse que el microcontrolador escogido posee 40 pines de conexión, cada uno de ellos con funciones muy bien establecidas, que podrán ser utilizadas mediante la correcta programación de los mismos.

Para este caso se utiliza, principalmente los módulos Motor Control PWM, el conversor Análogo-Digital, y UART con sus respectivas interrupciones.

Ahora para poder entender de mejor manera la correspondencia entre el interior y el exterior del microcontrolador, en la Figura 3.6 se puede ver la organización interna del mismo.

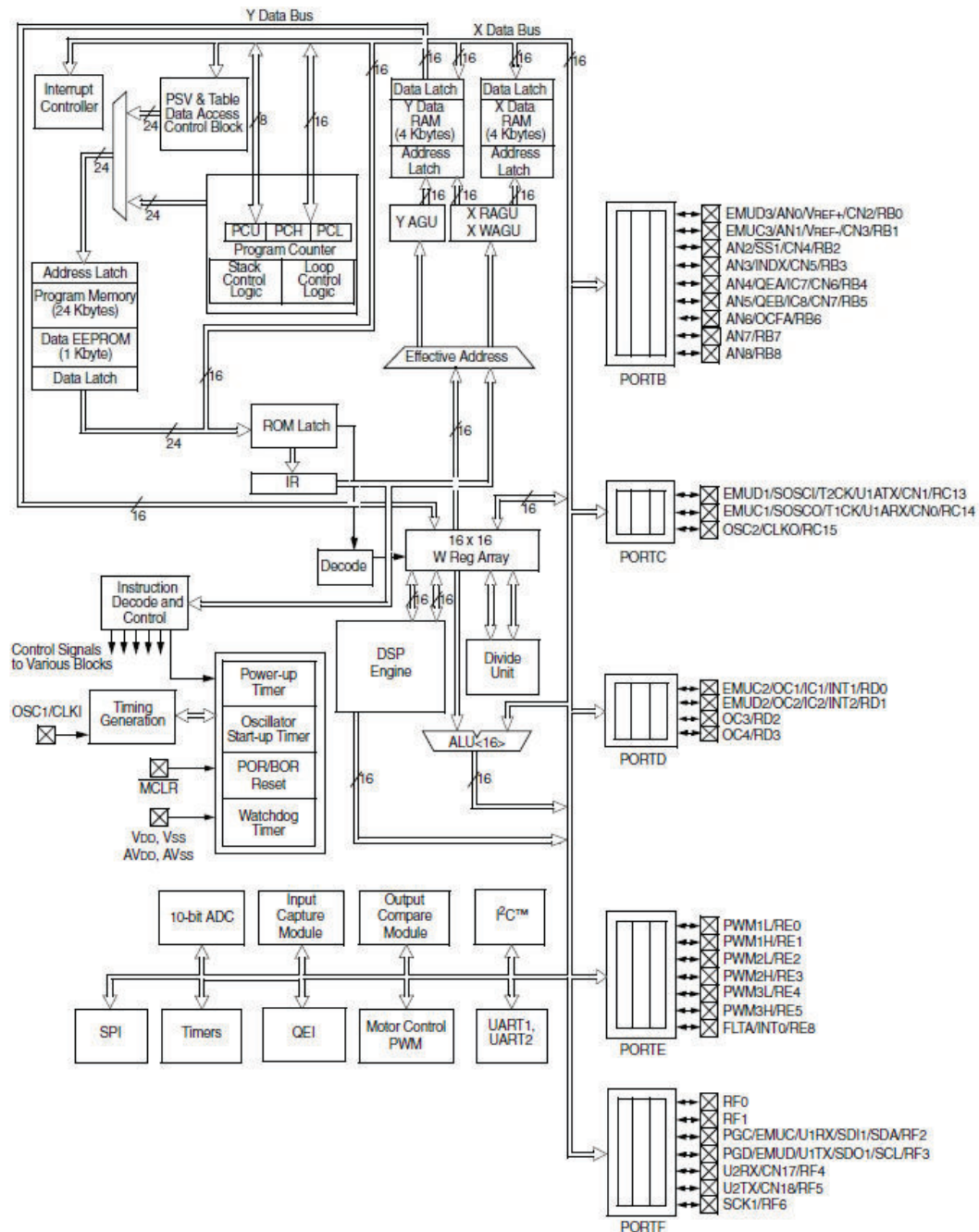


Figura 3.6 Organización Interna DSPIC30F3011 [12].

Como puede verse este microcontrolador posee salidas dedicadas para utilizar el módulo Motor Control PWM, las cuales permiten manejar tanto al servomotor como al motor BLDC. Esta es la característica principal de esta familia de PICs, la cual es hecha para aplicaciones específicamente de manejo de motores.

Además se puede ver la conexión del módulo conversor análogo-digital con sus respectivas entradas. Para realizar la comunicación posee dos módulos UART. A continuación se detalla el uso de cada uno de estos módulos.

3.2.2.1 Módulo PWM para el Control de Motores

Este modo permite producir una salida de frecuencia fija seleccionable modulada por ancho de pulso, con una resolución de 16 bits.

En la Figura 3.7 se muestra la operación de este módulo.

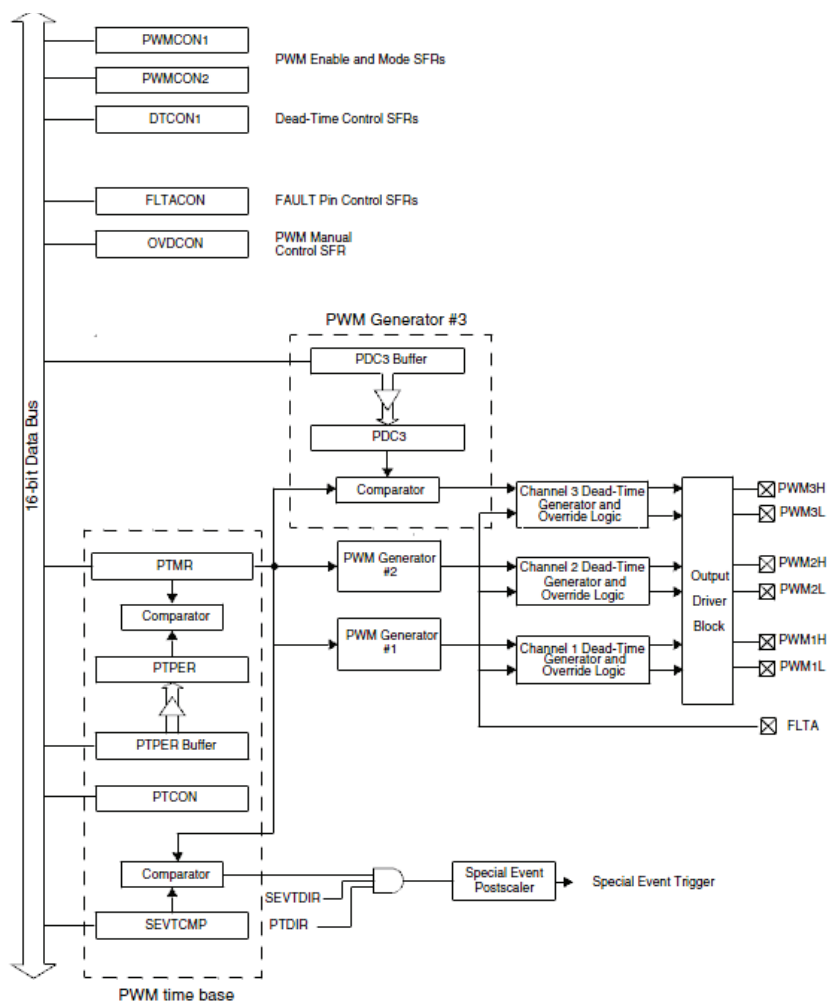


Figura 3.7 Diagrama de Bloques del Módulo PWM [12].

Para configurar el módulo PWM se siguen los siguientes pasos:

1. Se configura el puerto E como salida para las señales PWM.
2. En el registro PWMCON1, se setea a los bits 4,5 y 6 para activar PWMH. Y mediante el seteo de los bits 8, 9 y 10 se tiene el modo PWM independiente.
3. Los registros PDC1, PDC2, PDC3 se los iguala a cero para tener delta igual a cero.
4. Para configurar el prescaler del periodo MCPWM, en el registro PTCON el bit 3 se coloca en uno y el bit 2 se carga con cero.
5. Para configurar el período del PWM se carga el registro PTPER con el valor de 10000.
6. Con el seteo a uno del bit 15 del registro PTCON se activa el Timer base de MCPWM.

El período de la señal se calcula como:

$$\text{Período} = [(PRx)+1]*4*Tosc*(\text{Valor pre-escaler TMRx})$$

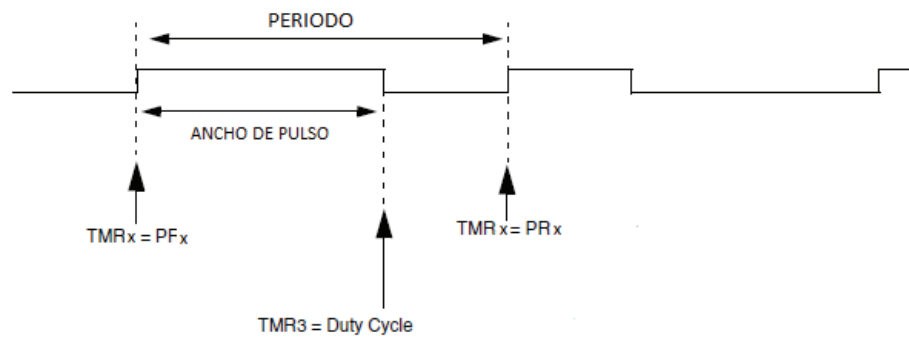


Figura 3.8 Señal de salida PWM [12].

3.2.2.2 Conversor Análogo-Digital

El DSPIC30F3011 posee 9 entradas que van desde RB0 hasta RB8, para realizar la conversión Análoga/Digital.

La conversión de una señal análoga resulta en su correspondiente número digital de 10 bits.

En la Figura 3.9, se muestra el diagrama del convertor A/D.

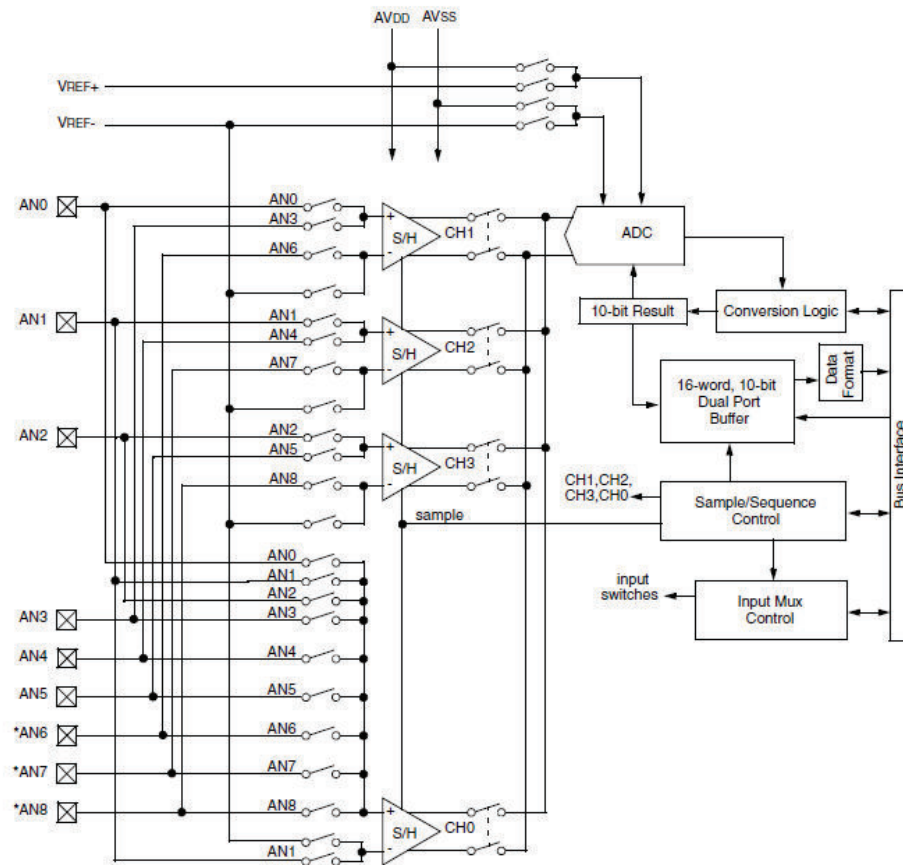


Figura 3.9 Diagrama de bloques del Convertor A/D [12].

Para la conversión analógica digital se procede a utilizar la librería `Adc_Read`, la cual permite realizar la conversión, usando como referencia positiva VCC del micro controlador y como referencia negativa GND.

En el caso de este sistema se emplean 2 canales AD de los pines RB6 y RB7 del puerto B, y los pines RB0 a RB3 se los usa para el manejo de los datos hacia el LCD.

3.2.2.3 Módulo de comunicación UART

Para realizar la comunicación del DSPIC con la PC se utiliza la librería UART de Mikro C. En esta librería se dispone de todas las opciones necesarias para la configuración de la comunicación.

Los comandos principales utilizados para esto son:

Uart_Init (velocidad (baudios)), con este comando se configura la velocidad de transmisión de los datos.

Uart_Data_Ready, el cual permite conocer si el buffer de recepción está listo para recibir.

Uart_Read_Char, permite recibir y leer los datos que envía la PC.

Uart_Write_Char, esta opción escribe en el buffer para poder enviar desde el microcontrolador a la PC.

En la Figura 3.10 se visualiza el diagrama de bloques simplificado del módulo UART.

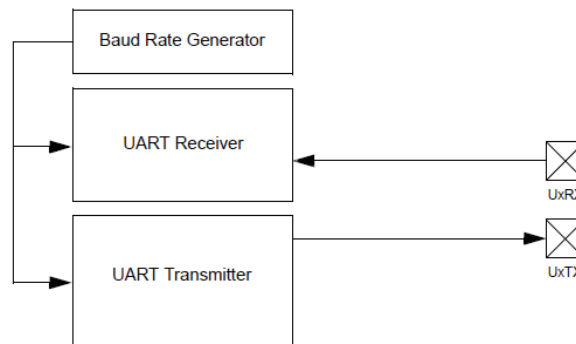


Figura 3.10 Diagrama de bloques del UART [12].

3.3 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN LABVIEW 2009

Para el diseño de la interfase gráfica se utiliza la herramienta de programación LABVIEW 2009, la cual contiene las instrucciones que permiten programar de manera gráfica.

Como se dijo antes, en esta interfase se puede comandar el sistema de manera automática o manual, así como también se puede monitorear los valores de presión diferencial que entregan los sensores y verificar el funcionamiento de los actuadores.

Este lenguaje de programación es de tipo gráfico y de modo secuencial, dispone de instrucciones de programación gráfica, mediante las cuales se puede realizar visualización y control de las variables, así como también se dispone de bloques que permiten realizar la comunicación de tipo serial con el DSPIC. La Figura 3.11 presenta un diagrama de programación en LABVIEW.

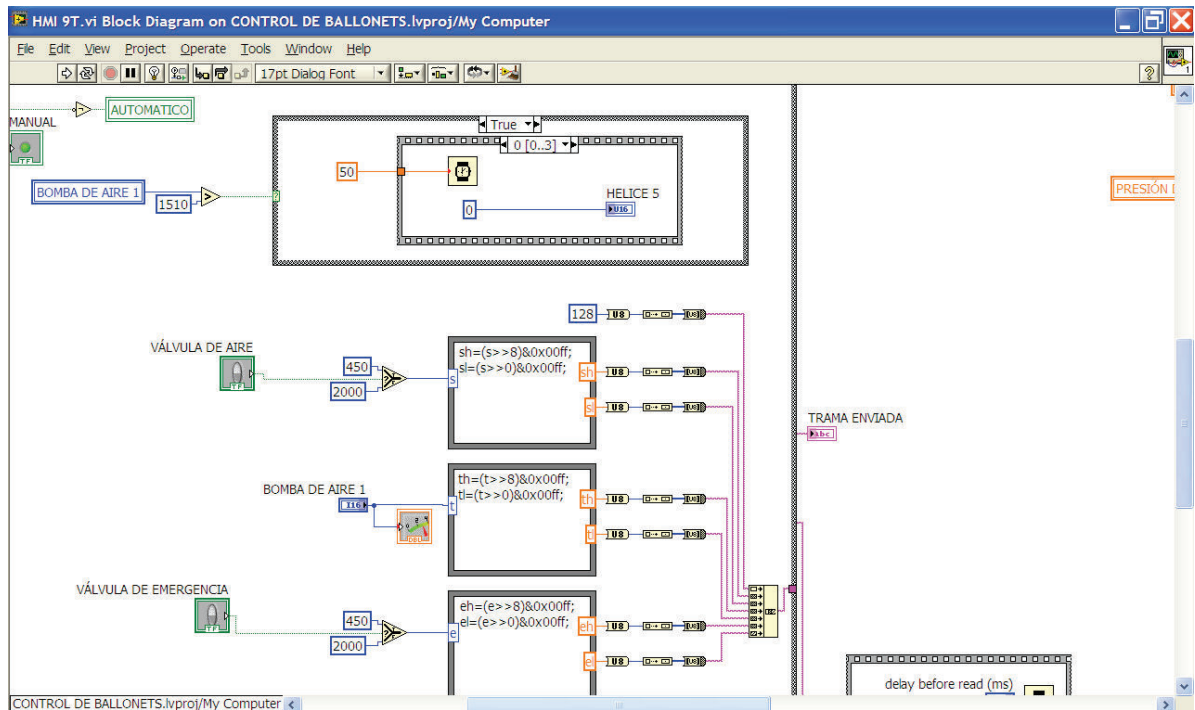


Figura 3.11 Ventana de Programación Gráfica en LABVIEW 2009.

3.3.1 INTERFASE HUMANO-MÁQUINA (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 3.12, 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 permite escoger el modo de funcionamiento del sistema, sea manual o automático.

En modo automático el sistema accede sólo 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 debe haber la 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.

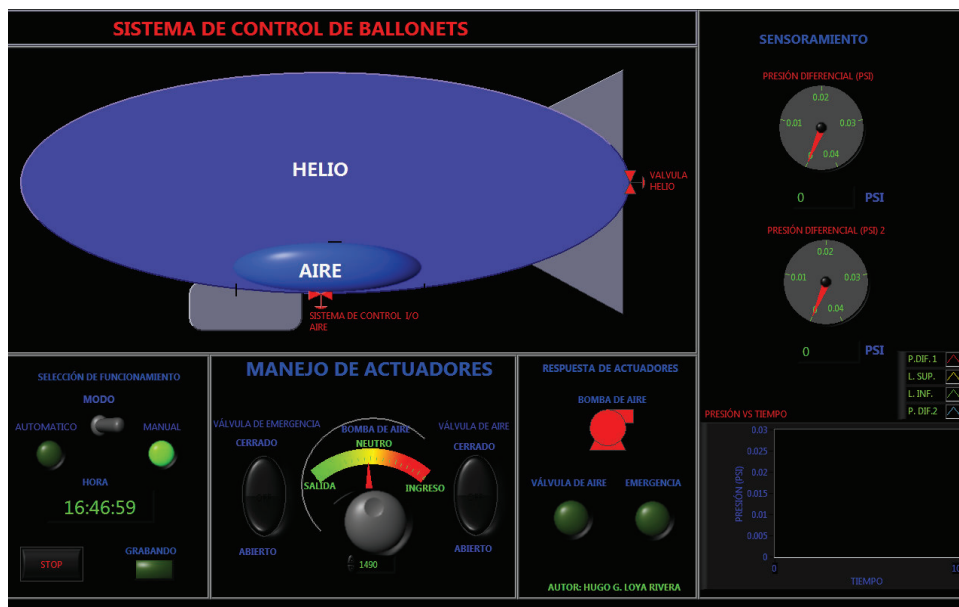


Figura 3.12 HMI del Sistema de Control de Ballonets.

3.3.1.1 Administración de datos en LABVIEW [15].

La administración de los datos del sistema es muy importante durante el vuelo del dirigible. Para ello, en la interfase gráfica del sistema (HMI) se dispone de la opción para guardar los datos de la variable de presión y de esta manera saber cómo ha variado la presión en el transcurso del tiempo, es decir se pueden realizar gráficas de los historiales que se produzcan durante un vuelo, y de esta manera ver el comportamiento del sistema.

El almacenamiento de los datos se realiza cada segundo, esto debido a que la presión diferencial es una variable que puede variar rápidamente, ya sea por cambios repentinos de temperatura, principalmente humedad, presión barométrica y altura.

Todos estos valores se almacenan en una base de datos en el programa Microsoft Excel, en donde se los puede analizar.

3.4 PROGRAMACIÓN DE LOS MÓDULOS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA XBEE

El sistema de comunicación para el prototipo de control de ballonets está compuesto por 2 módulos XBEE, uno de los cuales se encuentra conectado en la tarjeta de control, que está acoplada al dirigible y otro que se encuentra en tierra, conectado a la unidad base desde donde se monitorea y controla el prototipo.

Las variables principales que se deben programar en el módulo son:

- Dirección de origen.
- Dirección de destino.
- Velocidad de transmisión de los datos.
- Potencia de transmisión.

Para tener una configuración punto a punto, se debe colocar como dirección de origen la dirección de destino que posea el otro módulo y viceversa. La velocidad de transmisión dependerá de la programación del microprocesador y de la velocidad que se configura en el HMI en la PC.

En el caso de la potencia de transmisión, se dispone de cuatro opciones, pero para este caso se utiliza la opción de la más alta, que permite tener un alcance de hasta 1km con línea de vista. Esta altura se considera suficiente para verificar el funcionamiento del sistema, ya que el vuelo del dirigible se lo hace hasta esta altura, por seguridad del sistema y por la necesidad de conservar energía.

Para realizar la configuración de los módulos XBEE, se posee un software en el cual se programan los parámetros antes descritos. En la Figura 3.13 se muestra la ventana donde se realiza la configuración de los XBEE. En ella se puede configurar los 4 ítems antes mencionados, después de lo cual se procede a escribirlos en el módulo XBEE.

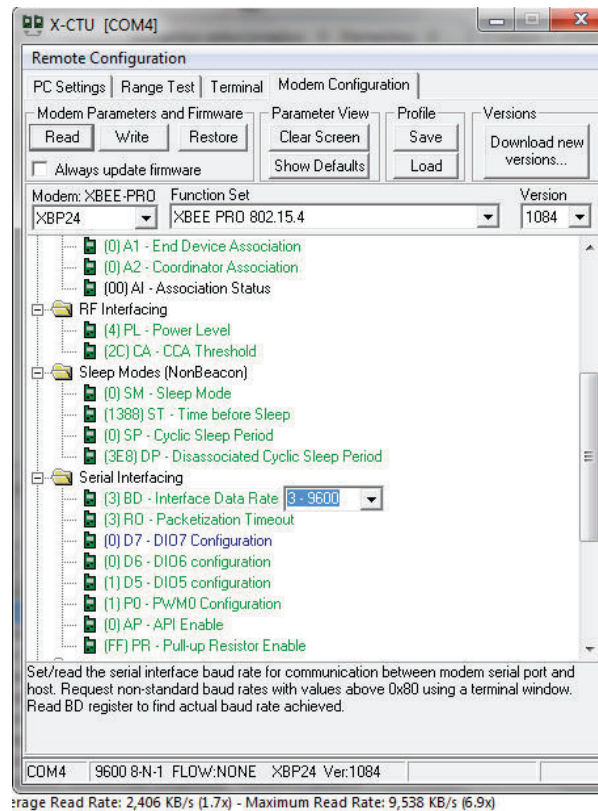


Figura 3.13 Ventana de programación de los módulos XBEE.

3.5 PROGRAMACIÓN DE LOS CONTROLADORES DE VELOCIDAD

Para poder manejar el motor, que sirve como bomba de aire, se utiliza un controlador de velocidad, el cual es básicamente un convertor DC –AC.

Este dispositivo permite transformar el voltaje DC, que dan las baterías LiPo, en un voltaje trifásico con el cual funciona el motor.

Este controlador de velocidad dispone de parámetros que deben ser programados de acuerdo con el motor que se requiera manejar.

Los parámetros principales a ser programados son:

- Tiempo de la rampa de aceleración.

- Tipo de freno.
- Tiempo de la rampa de desaceleración.
- Inversión de giro.
- Tipo de batería a utilizar.

Estos cuatro parámetros permiten acoplar el motor al controlador de velocidad, a la vez que se acoplan a las necesidades del sistema de control de ballonets.

La programación del controlador de velocidad se lo realiza mediante un software que da el fabricante, para ello se debe conectar mediante un cable USB a la PC.

Dentro de este software, se configuran los cuatro parámetros anteriormente mencionados y se guarda esta configuración en el controlador de velocidad.

Para verificar el funcionamiento correcto del controlador de velocidad, al conectar el motor y encender el switch, se debe escuchar una melodía que indica que el controlador está listo para accionar el motor. Además se dispone de luces indicadoras para conocer el estado y el giro del motor.

La luz naranja indica que el motor está detenido, la luz roja indica el motor funcionando en un sentido y la luz verde indica el funcionamiento del motor en sentido inverso.

Este controlador de velocidad va conectado al DSPIC, el cual le envía la señal de control, que en este caso es una señal PWM, y cuya variación de tiempos da la variación de velocidad del motor.

En la Figura 3.14 se tiene la ventana de programación del controlador de velocidad.

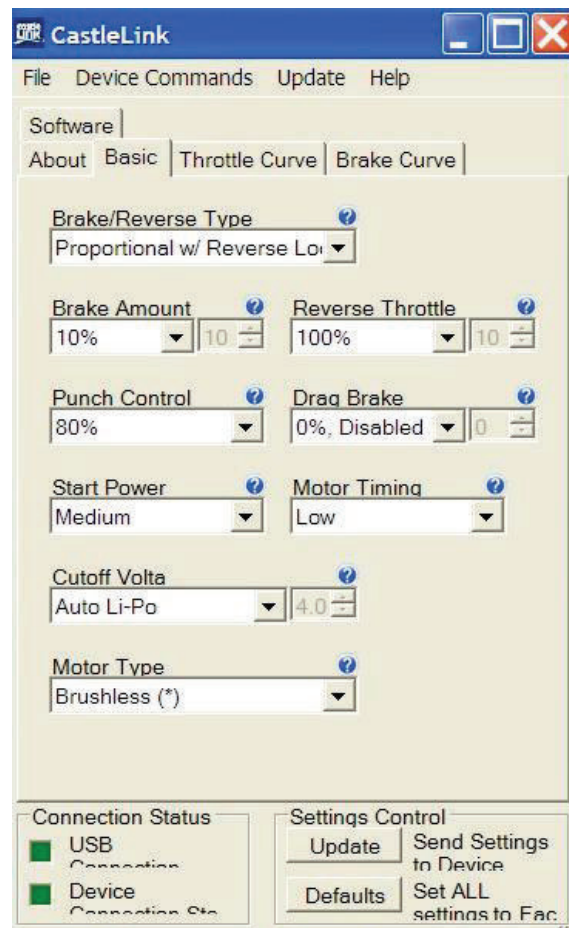


Figura 3.14 Ventana de programación del controlador de velocidad.

Como puede verse en esta ventana, se configuran todos los parámetros que permiten manejar al motor, entre los principales se configura el freno y la inversión de giro, así como la potencia en el arranque y la máxima velocidad que puede llegar a tener.

También se configura la batería que sirve de alimentación al motor, para este caso es una batería LiPo. Después de realizar todos estos ajustes se procede a cargar el programa de controlador de velocidad, con lo cual está listo para conectar al motor.

CAPÍTULO 4.

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los resultados obtenidos en las pruebas destructivas, realizadas en distintas probetas construidas por el área de aeronáutica, además se muestran resultados de medidas de presión diferencial, realizadas sin el control de compensación de presión y después con el control automático del ballonnet.

También se muestran los resultados de las pruebas con el dirigible ubicado a una altura recomendable, para verificación del sistema de compensación de presión y control de ascenso-descenso, esto se lo realiza tomando las medidas de protección pertinentes para la protección del sistema construido y del globo.

4.1.1 PRUEBAS DE PRESIÓN PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL MATERIAL

En esta sección se analiza los resultados obtenidos al realizar pruebas destructivas, con las probetas de 3 metros de longitud, cuando son sometidas a fuertes presiones.

Para poder conocer los valores dentro de los cuales va a funcionar el prototipo de control de ballonets, se construyen probetas del mismo material del envoltorio del dirigible.

Las probetas mencionadas son sometidas a presión, mediante la introducción de aire por medio de un compresor, esto permite conocer hasta qué punto puede soportar el material sin sufrir daños. Los datos obtenidos permiten decidir dentro de que rango de presión diferencial, se debe mantener con el control automático del sistema. Es decir, que sólo de acuerdo a los resultados experimentales, se puede saber los límites permitidos para el algoritmo de control del sistema.

Se realizan varias pruebas y así se puede encontrar datos, que después de ser analizados, permiten establecer los límites de seguridad, para que el envoltorio del dirigible mantenga su forma aerodinámica y no esté expuesto a presiones internas muy altas, que podrían provocar su explosión.

También se puede conocer el límite inferior de presión, el cual no puede descender, para que el dirigible mantenga su forma aerodinámica y pueda ser controlado por el piloto.

Las pruebas destructivas de las probetas son realizadas a la intemperie, para ayudar en la disipación del ruido que provocaban al estallar, en la Figura 4.1 se puede ver la probeta a la cual se le ingresa aire, por medio de la manguera de color plomo que está conectada al compresor, y con la manguera azul se determina el valor de presión diferencial al cual se encuentra sometida.



Figura 4.1 Probeta de 3 metros utilizada en pruebas destructivas.

En la Figura 4.2 se muestran los resultados de una de las pruebas destructivas, como puede verse cuando se tiene una presión diferencial de 0.7 psi, el envoltorio de la probeta estalla. Después de que estalla la presión cae abruptamente, debido a que la explosión provoca una gran abertura en el envoltorio del dirigible.

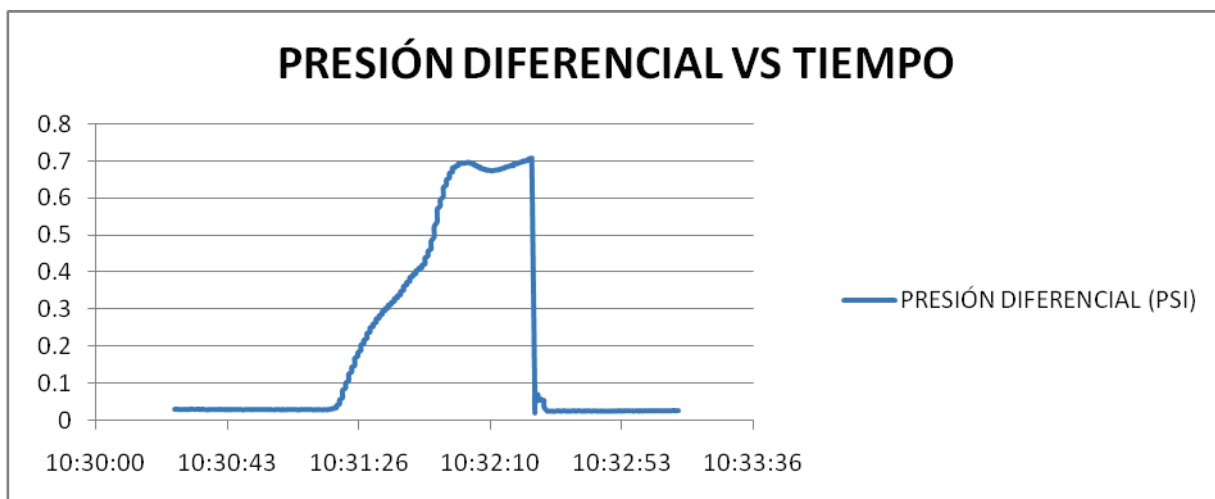


Figura 4.2 Datos de pruebas destructivas.

Después de realizar varias pruebas destructivas y encontrar una similitud en los datos, se concluye que la presión diferencial no debe nunca llegar o superar los 0.7 psi.

Por esta razón se llega a la decisión de que el rango, para el sistema de compensación de presión por medio del ballonet, se mantenga desde 0.01 a 0.02 psi de presión diferencial, el cual está muy por debajo del valor en el que puede explotar, para tener la mayor seguridad de que el envolvente no sufra ningún tipo de daño por sobrepresión.

4.2 PRUEBAS DE PRESIÓN, TEMPERATURA, HUMEDAD SIN SISTEMA DE CONTROL DE BALLONETS

Como se ha venido explicando en todo este proyecto, mantener la presión interna del dirigible es muy importante, ya que de ello depende que el piloto pueda maniobrar de una manera óptima.

Los cambios climáticos así como de otros factores, velocidad de viento, radiación solar, etc., influyen directamente en la forma del envolvente de la nave.

En la Figura 4.3 se visualiza el envoltorio de un prototipo de 9 metros de longitud que ha permanecido una noche entera dentro del hangar, se puede divisar que el descenso de temperatura en la noche y el aumento de humedad interna produjo que se deformara la envoltorio.



Figura 4.3 Prototipo de 9 metros de longitud expuesto al frío de la noche.

Como pueden verse los planos de vuelo no están en su posición original, y si esto ocurriera durante un vuelo provocaría que el piloto pierda el control de la mayor parte de la nave.

Para poder verificar la teoría del efecto de los cambios de agentes climáticos y la manera como afectan al envoltorio, se realiza una segunda prueba midiendo la presión cuando se produce cambios excesivos de temperatura, humedad y exposición al sol.

Como se mencionó anteriormente, la presión interna del dirigible varía de acuerdo a la temperatura, humedad, altura, presión barométrica, exposición directa al sol.

Por ello se realizan pruebas de la influencia de algunas de estas variables sobre el dirigible en tierra. Se obtienen muchos datos que permiten verificar la teoría de cómo influyen en el envoltorio del dirigible y el helio.

Se puede monitorear cambios de presión, cuando se expone a cambios de temperatura, humedad y exposición al sol.

Estos datos son analizados y como se ve en la Figura 4.4, el rango de presión diferencial dentro del cual el dirigible debe mantenerse, no cumple.

La variación de presión diferencial tiene relación directa con los cambios de temperatura de la Figura 4.5, y una relación inversa con los cambios de humedad que se muestran en la Figura 4.6.

Estos datos son tomados sin incorporar al dirigible el sistema de control de ballonets, por lo que las mediciones de presión diferencial no se mantienen dentro del rango adecuado, ya que se tienen valores que superan los 0.02 psi y valores que están bajo el límite inferior de 0.01 psi.

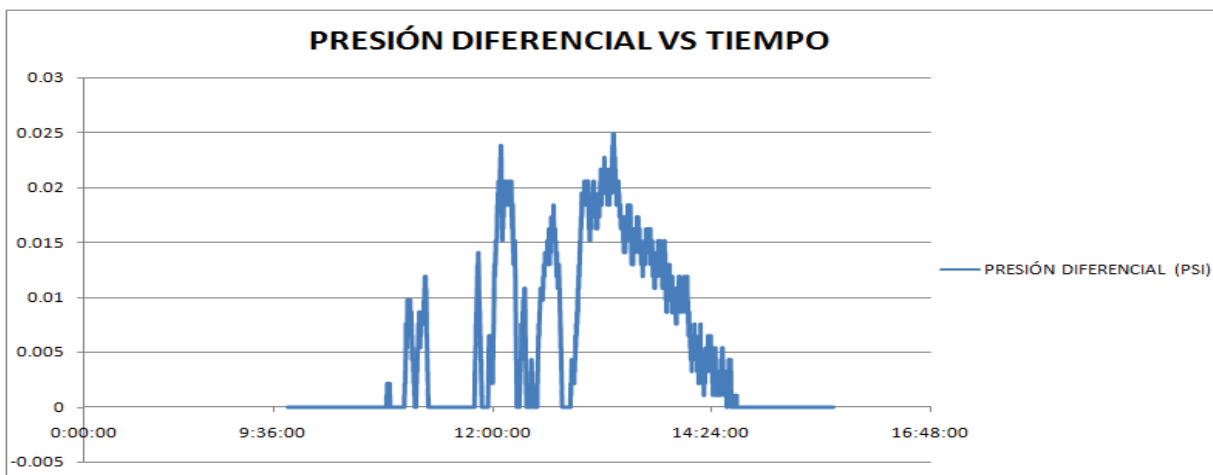


Figura 4.4 Datos de Presión Diferencial sin sistema de ballonets.

Los datos de temperatura son tomados en el mismo instante que los de presión, por lo que puede verse la relación directa que existe entre el aumento de temperatura y presión.

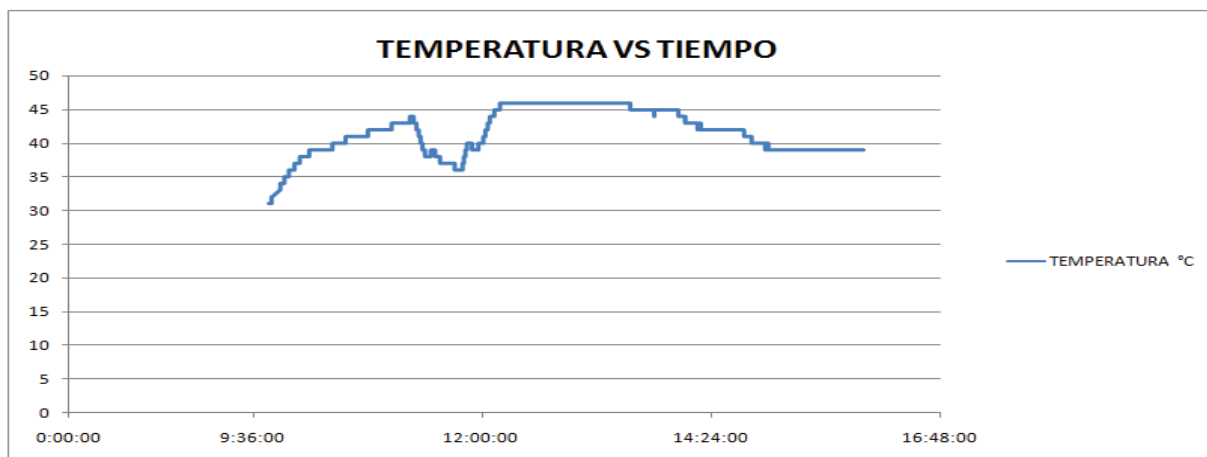


Figura 4.5 Datos de temperatura.

Los datos de humedad en cambio tienen relación inversa a los de temperatura. Como se conoce la humedad disminuye conforme la temperatura aumenta y viceversa.

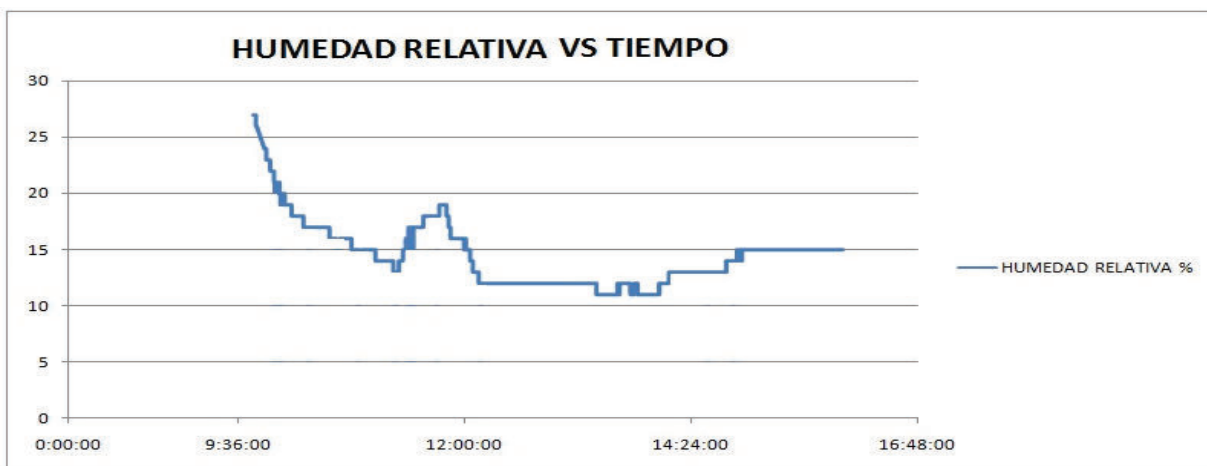


Figura 4.6 Datos de humedad.

Las variaciones de todas estas variables se manifiestan en el cambio de presión diferencial, por lo que la variable en la que se basa el control automático es precisamente la presión diferencial.

4.3 PRUEBAS DE LA VÁLVULA Y MOTOR DEL SISTEMA

Para lograr que el sistema funcione de la mejor manera, primero se realizan pruebas previas de funcionamiento del motor y la válvula en el ingreso y extracción del aire. Para ello se debe verificar que el flujo de aire que envía el motor, sea capaz de inflar el ballonet hasta su máxima capacidad. De acuerdo a las pruebas realizadas y dependiendo de la cantidad de flujo de aire que envía el motor, se tiene un tiempo estimado para el llenado del ballonet hasta el 100% de su capacidad.

Para verificar el funcionamiento de la válvula, se calibra el giro del servomotor, el cual dependiendo del valor de la señal PWM, la válvula se abre o se cierra completamente. Se comprueba que la válvula funciona correctamente con los valores de tiempo que se emplean. En la Tabla 4.1 se visualiza el tiempo y el estado de la válvula.

Tabla 4.1 Valores de tiempo de la señal PWM y estado de la válvula de control.

Tiempo de la señal PWM	Estado de la válvula
2300 us	Abierta
600 us	Cerrada

En la Tabla 4.2 se muestran los resultados, en los que se visualiza el porcentaje de velocidad del motor y el tiempo en el que se demora el ballonet en inflarse completamente.

Tabla 4.2 Valores de tiempo de la señal PWM y estado de la válvula de control.

% de Velocidad del Motor	Tiempo de llenado del ballonet
25	2 minutos
50	1 minutos
75	30 segundos

También se debe verificar que la válvula no presente fugas, aunque la ventaja es que como se está utilizando el aire como lastre, no representa nada si existen fugas mínimas, ya que serán nuevamente compensadas con el ingreso de más aire.

En la Figura 4.7 se visualiza un cambio de presión por la introducción de aire al ballonnet, pero después de ello se visualiza un descenso de presión por las pequeñas fugas que posee la válvula.

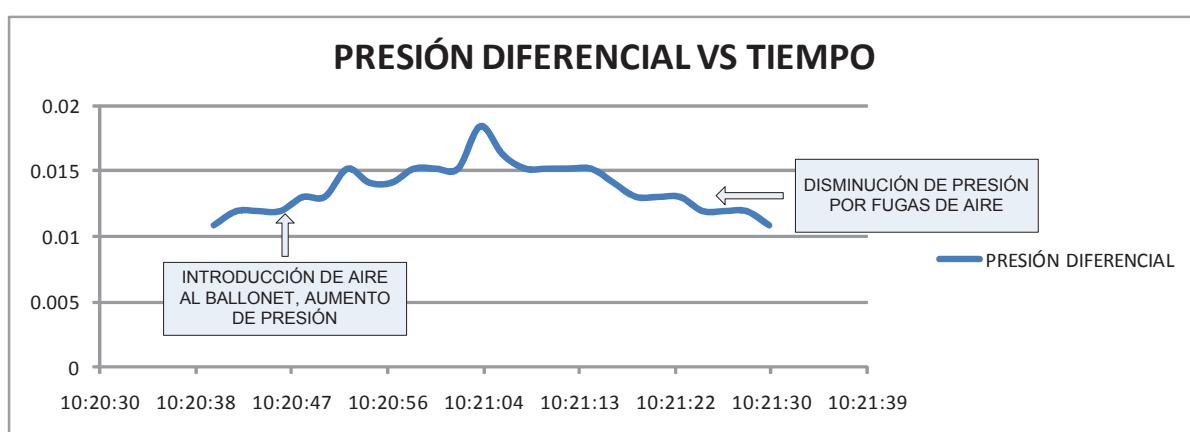


Figura 4.7 Datos de variación de presión por fugas de aire en la válvula de control.

La válvula construida es el primer prototipo, pero el diseño definitivo disminuirá al máximo las fugas de aire, esta tarea la realiza un equipo de ingenieros mecánicos que colaboran en el Proyecto PGA. El prototipo mejorado de la válvula de control se incorporará en el siguiente dirigible.

4.3.1 PRUEBAS DE COMPENSACIÓN DE PRESIÓN CON EL SISTEMA DE CONTROL CUANDO VARÍA TEMPERATURA Y HUMEDAD

Las pruebas del sistema se las hace con los resultados esperados, se realiza la compensación de presión del dirigible, garantizando siempre que mantenga su forma aerodinámica. También se puede verificar el correcto funcionamiento del motor y de la válvula para el ingreso y salida del aire del ballonnet. Se comprueba que no existan fugas de aire, con lo cual el prototipo cumple correctamente con su función para

poder ser escalado a prototipos de mayor tamaño y que serán implementados en el futuro, de acuerdo a lo que se requiera en el proyecto PGA.

A continuación se detalla el funcionamiento del sistema en modo manual y modo automático. En ambos casos el sistema funciona eficientemente.

4.3.1.1 MODO MANUAL DEL SISTEMA DE CONTROL DE BALLONETS

Este modo permite hacer primero una inspección y comprobación del sistema cuando se encuentre en tierra. Con esto se puede comprobar el funcionamiento tanto de la válvula como de la bomba de aire. Esto es fundamental antes de realizar cualquier misión con el dirigible. Se debe también verificar el estado de las baterías y el correcto funcionamiento de los sensores de presión de la tarjeta de control.

En este modo se puede guiar mediante los límites establecidos gráficamente en la pantalla de interfase, para no sobrepasar el límite superior y bajar del inferior.

El modo manual es también utilizado cuando el piloto disponga realizar un ascenso o descenso más rápido, o alguna maniobra de emergencia, en la que se deberá ingresar un gran volumen de aire al ballonet, para que el dirigible gane peso y sea llevado a tierra. En este caso se verifica el funcionamiento del control del ascenso y descenso de la nave.

En la Tabla 4.3 se visualiza los valores de presión en función de la altura a la que se encuentre el dirigible. Para estas pruebas se toma como altura máxima 5 metros, ya que se las realizan dentro del hangar, en donde se evita al máximo la influencia del viento, logrando de esta manera una mejor visualización del funcionamiento del sistema.

Tabla 4.3 Valores de presión diferencial involucrados en el control de ascenso y descenso.

Presión Diferencial (PSI)	Altura de elevación (m)
0.060	1
0.045	2
0.030	3
0.020	4
0.015	5

Los resultados de la presión y su relación con la altura, en el control de ascenso y descenso, pueden variar dependiendo del volumen de helio que se encuentre en el dirigible, así como también de otros factores como son la presión barométrica, la temperatura, humedad, entre otros que influyan sobre el envolvente.

Al presente proyecto se adjunta un video con las pruebas realizadas del control de ascenso y descenso, y de compensación de presión.

En la Figura 4.8 se muestra una imagen capturada del video que se menciona anteriormente, el sistema funcionando en modo manual, en donde se visualiza claramente la medición de presión en el transcurso del tiempo. Se pretende abrir la válvula de ingreso de aire, se puede observar la acción de ello.

En la Figura 4.9, al mirar la gráfica de presión en función del tiempo se nota claramente que hay una caída de presión, la cual es compensada por el sistema inmediatamente. Se puede notar el selector de modo de funcionamiento en automático.

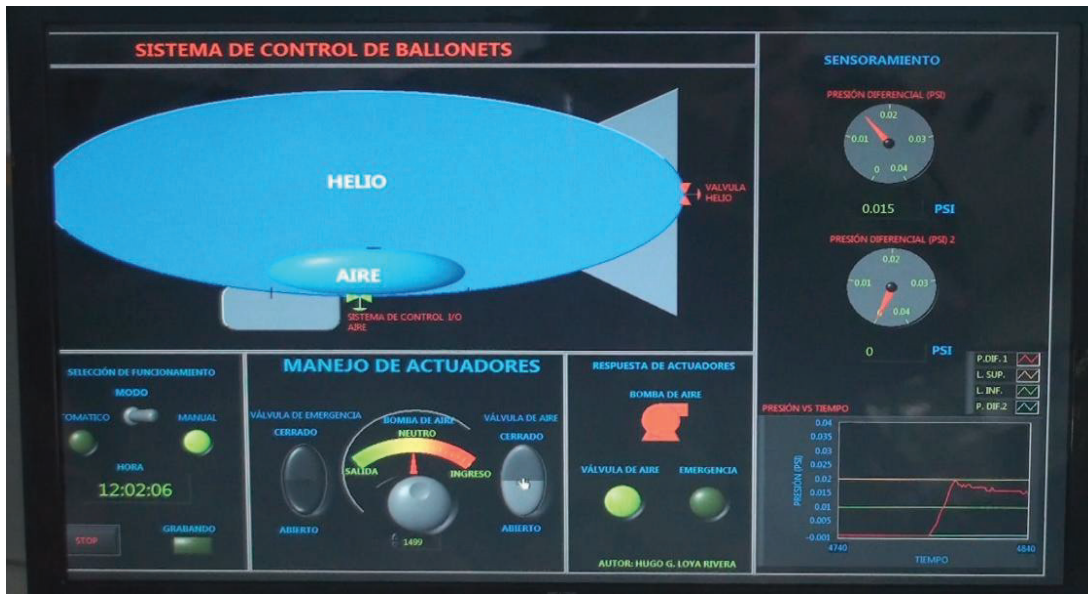


Figura 4.8 Imagen del sistema funcionando en Modo Manual.

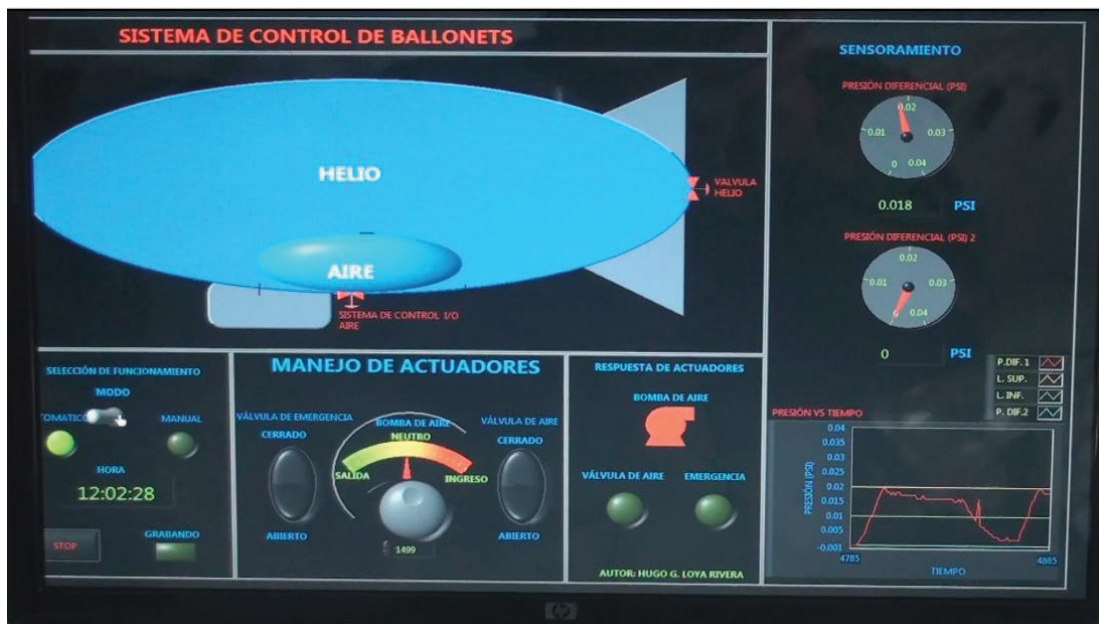


Figura 4.9 Imagen del sistema funcionando en Modo Automático.

4.3.1.2 MODO AUTOMÁTICO DEL SISTEMA DE CONTROL DE BALLONETS

Este es el modo principal y el más importante para el dirigible, ya que es el que permite mantener la presión interna constante y por lo tanto la forma aerodinámica.

Las pruebas realizadas muestran los resultados esperados, es decir el sistema compensa de manera automática cualquier cambio de presión que se vea afectado por temperatura, humedad, altura, presión barométrica, velocidad del viento entre otras.

Los resultados se observan en el gráfico de la Figura 4.10, en donde se puede ver que la presión diferencial se mantiene dentro de los límites permitidos.

Los datos son tomados cada segundo y se puede ver que la presión se mantiene entre los valores seteados como límites, para el caso de las pruebas, estas se realizan simulando caídas y aumentos de presión. Para simular y generar sobrepresión se procede a aplastar el envoltente consiguiendo que aumente la presión interior, en este caso el control automático compensa inmediatamente. De la misma manera para poder verificar la funcionalidad del sistema, cuando existe baja presión, se procede a sacar todo el aire del ballonnet de manera manual, y cuando el sistema de control detecta baja presión, procede a compensar rápidamente.

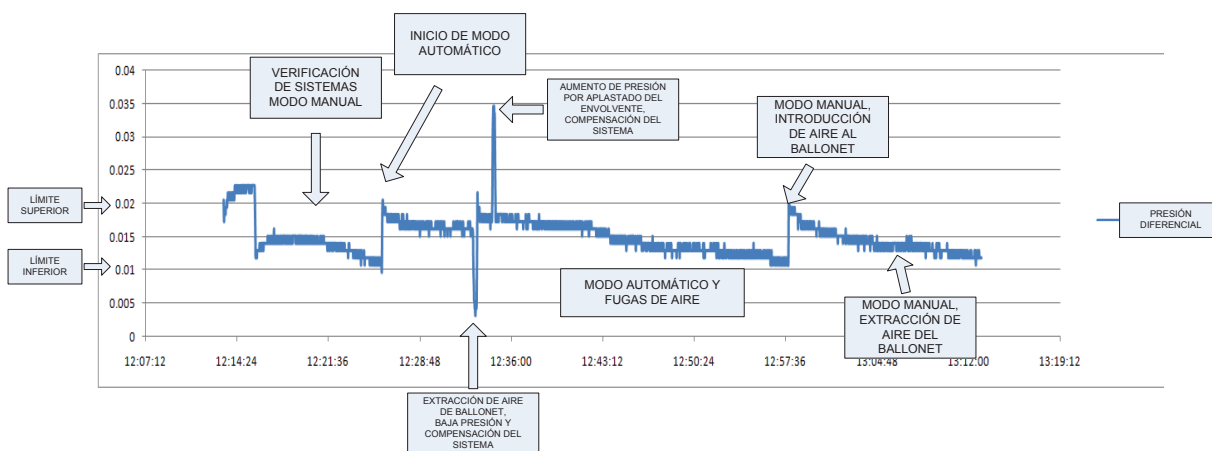


Figura 4.10 Datos de compensación del sistema en modo automático.

4.3.2 PRUEBAS DE TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE DATOS

Cumplir con estas pruebas es una etapa necesaria, ya que el dirigible cuando se eleve necesita un gran alcance de transmisión y recepción de los datos hacia la estación en tierra.

Las pruebas se realizan con los radios XBEE, pero éstos tienen la desventaja de perder el enlace cuando se supere una altura considerable. En lugar de estos dispositivos, cuando se construya el prototipo final del dirigible se utilizarán radios inalámbricos de 900MHz con comunicación serial, los cuales permitirán tener un mayor rango de alcance, ideales para la aplicación que se está desarrollando. Cabe mencionar que la tarjeta de control diseñada posee un puerto de comunicación serial para la conexión con los radios descritos.

El elemento principal de todos los sistemas del dirigible es la comunicación con la estación de monitoreo y control ubicado en tierra, ya que de esto dependerá cuán lejos se puede llegar a controlar el globo. Las pruebas con los módulos XBEE resultan satisfactorias, en un rango de hasta 1 kilómetro, pero al superar esta altura se tiene pérdida de datos. Esto se puede comprobar al colocar la tarjeta de control en el dirigible de 9 metros, el cual puede ascender hasta una altura de 1200 metros, en donde los radios dejan de enviar los datos. Para verificar la transmisión de la información, se desarrolla la trama de datos que se muestra en la Tabla 4.4, en donde se ve la cabecera de la trama y el fin de la misma.

Tabla 4.4 Trama de datos enviada para visualizarla en el HMI de monitoreo y control.

TRAMA QUE ENVIA DSPIC
\$DSP,2,DATO1,DATO2,A*AB

La trama consta de una cabecera que es \$DSP, después el número dos significa el número de datos que se envía en la trama, DATO1 es el dato del primer sensor,

DATO2 corresponde al valor de un segundo sensor y A*AB representa el fin de la trama. Con esto se tiene en el HMI la visualización de la trama de datos, la cual después de ser desfragmentada se puede obtener el valor de presión diferencial que envía el sensor.

En la Figura 4.11 se visualiza un esquema de conexión y transmisión de los datos entre los módulos XBEE.

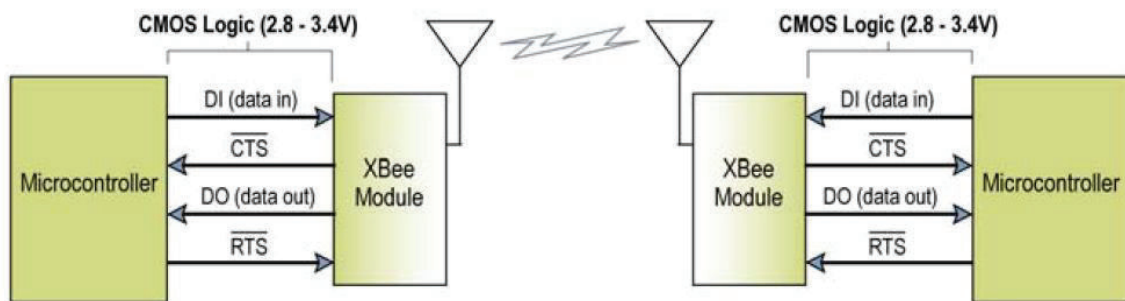


Figura 4.11 Esquema de interconexión inalámbrica de los módulos XBEE [10].

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de las pruebas realizadas y los resultados obtenidos de éstas, se ha llegado a las siguientes conclusiones y recomendaciones.

5.1 CONCLUSIONES

- El proyecto PGA ha contribuido con muchos avances dentro del campo de la investigación en el Ecuador, a partir de lo cual se han logrado metas y nuevos retos a ser superados dentro del campo aeronáutico; los cuales con la ayuda e intervención de las distintas áreas de investigación, serán superados.
- 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.
- 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 esta razón el control en este trabajo se realiza mediante un lazo de histéresis, que permite el ahorro de energía al máximo.
- El sistema de control de ballonets es un tema de tipo aeronáutico, al cual se incorpora un sistema electrónico automático, no se posee mucha información para su construcción, por lo que en este proyecto se trata de llevar a la realidad una idea que permita realizar esta tarea, aplicando en el diseño y construcción lo más posible, tecnología nacional, teniéndose como caso

específico el prototipo inicial de la válvula de control de ingreso y extracción de aire.

- La presión atmosférica varía con la altura, al igual que la temperatura por lo que este sistema ayuda en la compensación de estas variaciones mediante el control de la presión diferencial del dirigible, como se aprecia en la página de monitoreo.
- Después de haber realizado varias pruebas se puede comprobar que la presión interna, para mantener la forma del dirigible, es ligeramente mayor a la presión externa, es decir que la Presión Interna es igual a 1.1 veces mayor que la Presión Externa.
- Los sensores de presión diferencial utilizados son de un rango bastante pequeño, por lo que se los debe seleccionar cuidadosamente, ya que mediante la detección de la variación de la presión diferencial se puede realizar el control automático del ballonet.
- Desarrollar un sistema que sea liviano y efectivo, constituye un gran reto en esto proyecto, ya que como se ha mencionado, el principal inconveniente del dirigible es el peso, por ello se desarrolla todo el sistema lo más liviano posible.
- Manejar el peso del dirigible es de gran ayuda cuando se desea realizar un rápido descenso en caso de emergencia, esto permite economizar la energía de los motores principales y sobretodo tratar de hacer descender el dirigible lo más estable posible.
- El sistema de comunicaciones del prototipo se realizo mediante los módulos de comunicación inalámbrica XBEE, los cuales llegan a tener un alcance de

1Km como máximo, son muy eficientes y livianos; pero para un prototipo de dirigible que llegue a mayores alturas, se requiere tener radios de mayor potencia y alcance para evitar pérdida de información en algún instante.

5.2 RECOMENDACIONES

- 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.
- Los elementos construidos para este prototipo han sido diseñados mediante un mecanismo electrónico y mecánico, pero para la implementación del sistema, en dirigibles de mayor volumen, se recomienda construir sistemas más grandes y con diseños mecánicos mejorados.
- Se recomienda realizar una inducción del prototipo a varias personas para que tengan la capacidad de manejar el sistema y saber cómo realizar una maniobra en caso de emergencia.
- El proyecto Plataforma de Gran Altitud ha abierto las puertas en muchos campos de investigación y de los que se ha adquirido mucha experiencia, por lo que se recomienda seguir en la investigación de los dirigibles hasta llegar a la implementación de uno que sea totalmente ecuatoriano.
- Como en todo proyecto estatal, se necesita realizar varios trámites, en lo relativo 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 recomienda buscar una manera de optimizar los procesos de compra y de importación de dispositivos inexistentes en el país.

- Este sistema ha sido llevado a la realidad mediante la colaboración y esfuerzo de muchas personas que han trabajado en equipo; en la parte técnica la Escuela Politécnica Nacional ha sentado las bases necesarias con las cuales se ha desarrollado el prototipo, por lo que se recomienda tratar de involucrarse más en este tipo de proyectos, que abrirían más campos de investigación para las siguientes generaciones.

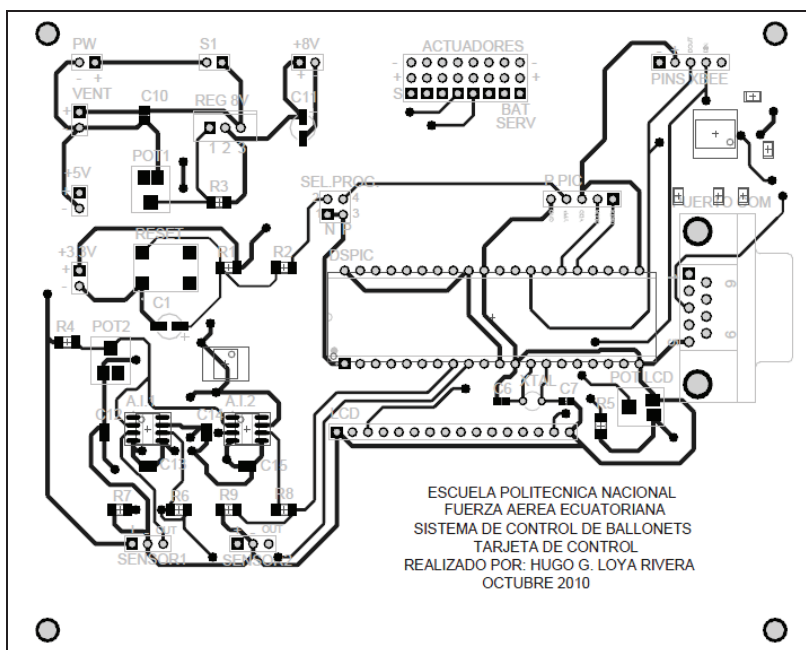
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. **WIKIPEDIA**. Dirigible. <http://es.wikipedia.org/wiki/Dirigible>
- [2]. **BEMTO**, Alexandra. Modeling and Nonlinear Control for Airship Autonomous Flight. Tesis Doctoral en Ingeniería Mecánica. Universidad Técnica de Lisboa. Diciembre 2007.
- [3]. **WIKIPEDIA**. Submarino. <http://en.wikipedia.org/>
- [4]. **WIKIPEDIA**. Flotabilidad. <http://en.wikipedia.org/>
- [5]. **WIKIPEDIA**. Ley_de_Boyle-Mariotte. <http://en.wikipedia.org/>
- [6]. **ARAGÓN**, Alejandro. **CUEVAS**, José. **DELGADO**, José. High-Altitude Platforms for Wireless Communications. John Wiley & Sons. Singapore. 2008
- [7]. **OMEGA**. Manuals.
<http://www.omega.com/manuals/manualpdf/M0258.pdf>
- [8]. **BURR-BROWN**. Manuals.
http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/I/N/A/1/INA118.shtml
- [9]. **NATIONAL SEMICONDUCTOR**. Manuals. Application Note.
<http://www.national.com>
- [10]. **MAXSTREAM**. XbeePro RF Module. Data Sheet. Lindon 2005.
- [11]. **WIKIPEDIA**. Surface-mount-technology. http://en.wikipedia.org/wiki/Surface-mount_technology

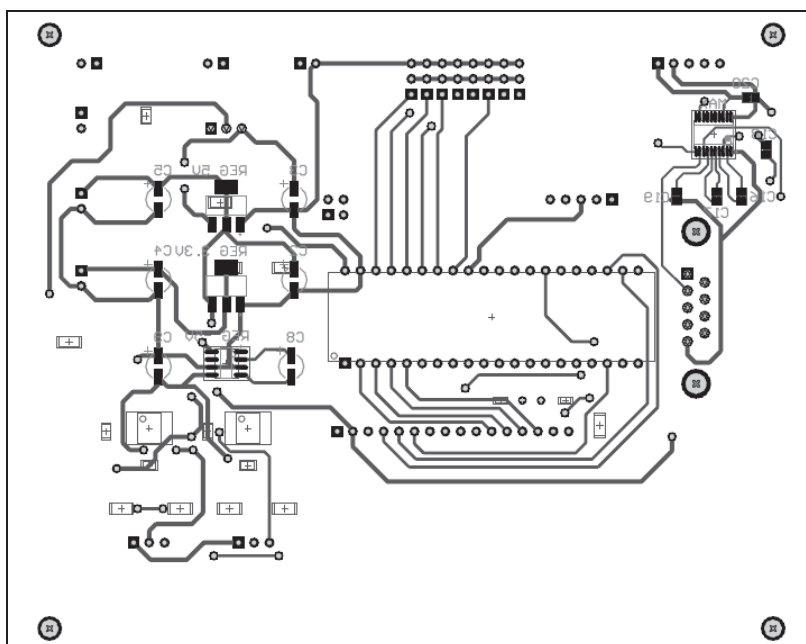
- [12]. **MICROCHIP.** DSPIC30F3010/3011 Data Sheet. Microchip Technology Incorporated. U.S.A. 2005.
- [13]. **TODOROBOT.** Servomotor. <http://www.todorobot.com.ar/documentos/servomotor.pdf>
- [14]. **MIKROE.** http://www.mikroe.com/pdf/mikroc_pic_pro/mikroc_pic_pro_manual_v100.pdf
- [15]. **NATIONAL INSTRUMENTS.** LABVIEW 2009. Manual de Programación. Ecuador. 2009.

ANEXOS

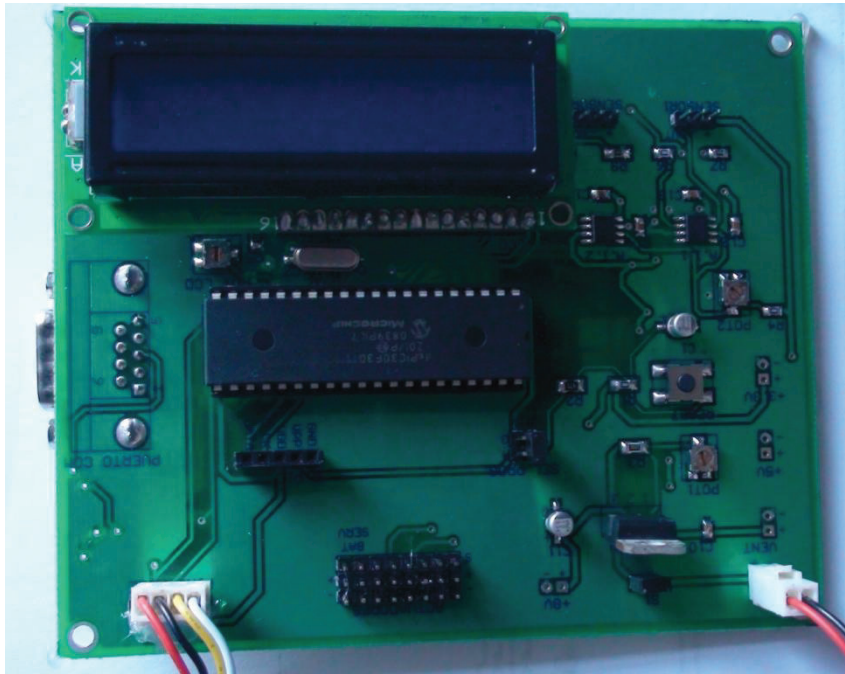
ANEXO 1.1 RUTEADO PLACA DE CONTROL



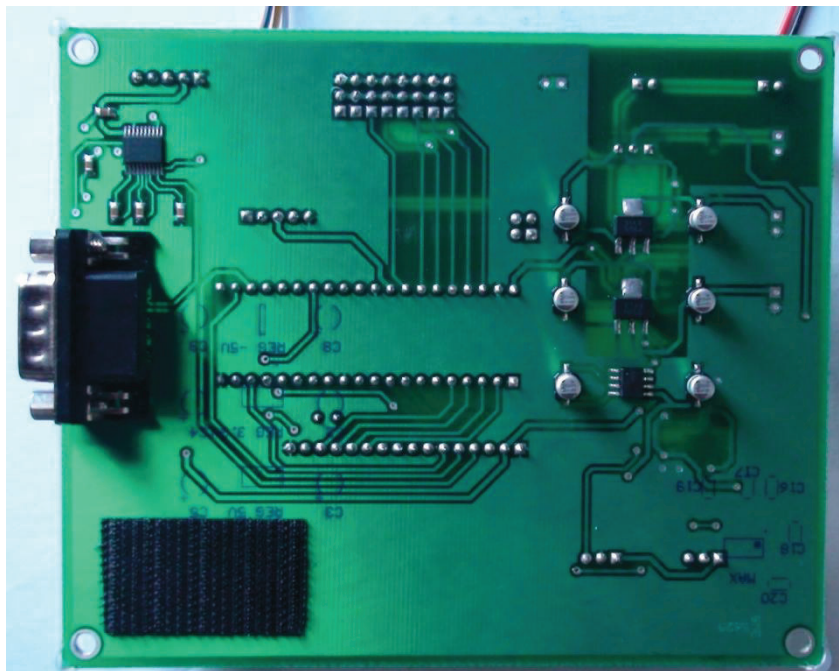
Placa de Control. Vista Superior



Placa de Control. Vista Inferior

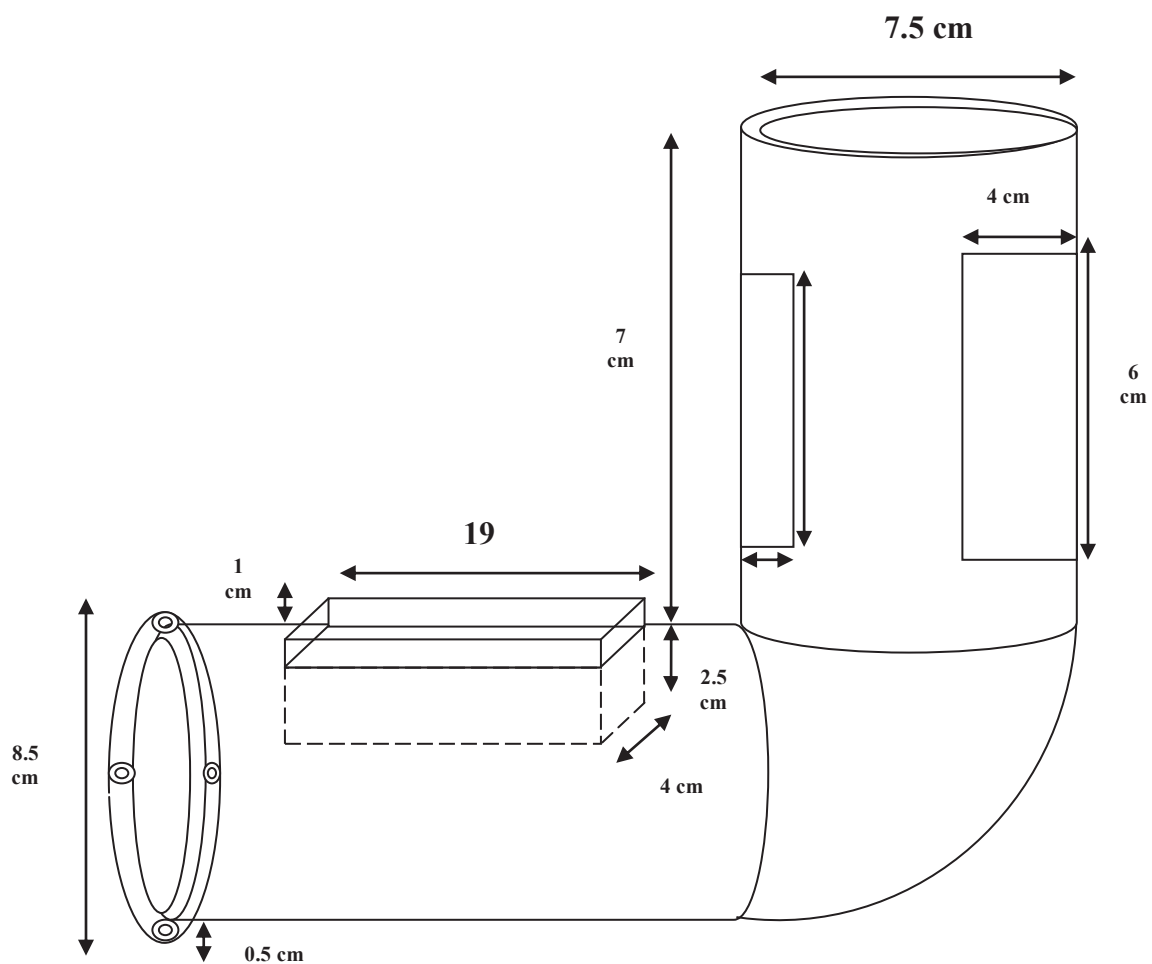
ANEXO 1.2 FOTOS DE LA PLACA DE CONTROL

Placa de Control Impresa. Vista Superior

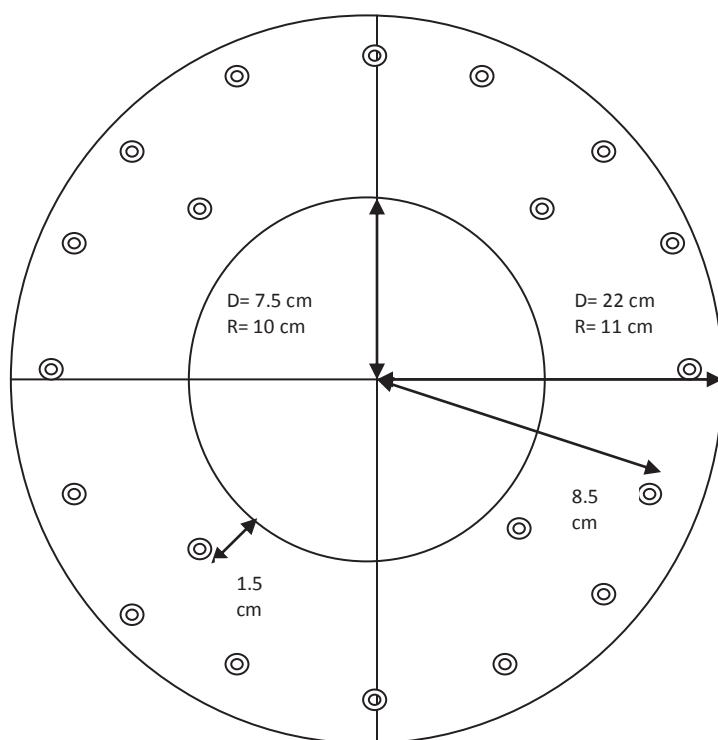
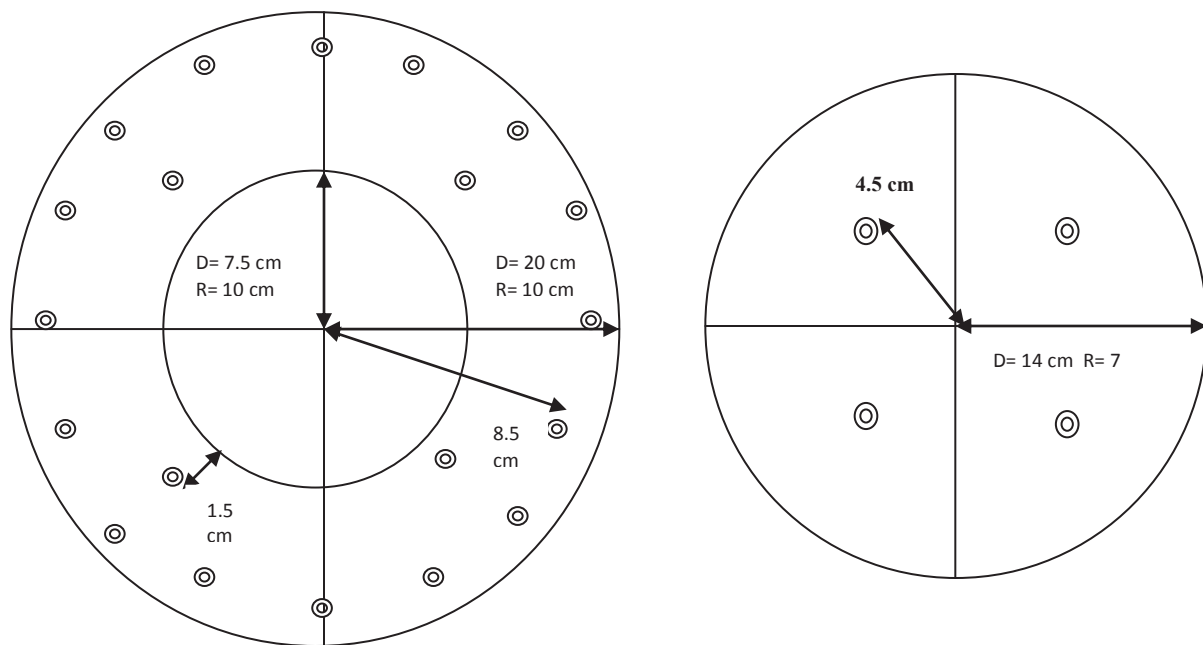


Placa de Control Impresa. Vista Inferior

ANEXO 1.3 DIAGRAMA DE CONSTRUCCIÓN DE VÁLVULA

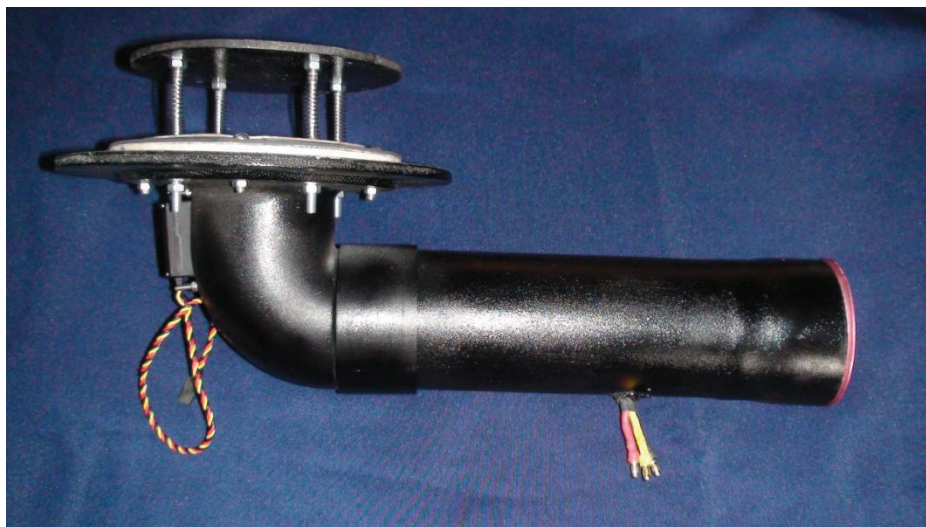


Plano de construcción de ducto para bomba y válvula de aire.

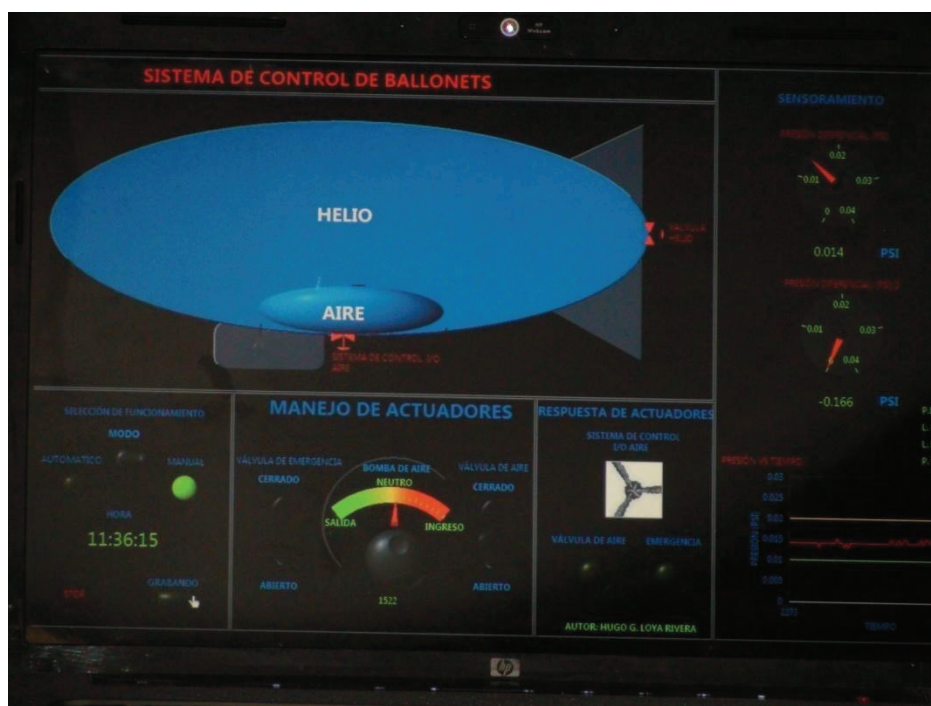


Planos de construcción de la válvula de aire.

ANEXO 1.4 FOTOS DE VÁLVULA Y VENTILADOR



Válvula y Bomba de aire del sistema.



HMI de Monitoreo y Visualización del Sistema.

ANEXO 1.5 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN EL PROTOTIPO 6 T.



Prototipo 6T implementado con el control de ballonets.



Monitoreo del sistema.

ANEXO 1.6 FOTOS DEL PROYECTO PLATAFORMA DE GRAN ALTITUD

Foto de Visita de Autoridades Militares al Proyecto PGA.



Vuelo del Prototipo 15-T sobre el cielo de la Provincia de Tungurahua.