

**DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA MÓVIL PARA UN PANEL SOLAR DE 205 W CON  
DOS GRADOS DE LIBERTAD**

**MARCO ANTONIO CAIPE BALCÁZAR  
ANDRÉS FELIPE CELIS PINZÓN**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ D.C.  
FEBRERO DE 2013**

**DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA MÓVIL PARA UN PANEL SOLAR DE 205 W CON  
DOS GRADOS DE LIBERTAD**

**T.G. 1125**

**MARCO ANTONIO CAIPE BALCÁZAR  
ANDRÉS FELIPE CELIS PINZÓN**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**DIRECTOR: GABRIEL PERILLA GALINDO  
INGENIERO ELECTRÓNICO, M.Sc.**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ D.C.  
FEBRERO DE 2013**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA**

<b>RECTOR MAGNÍFICO:</b>	<b>P. JOAQUÍN SÁNCHEZ GARCÍA S. J.</b>
<b>DECANO ACADÉMICO:</b>	<b>Ing. JORGE LUIS SÁNCHEZ TELLEZ M.Sc., M.Ed.</b>
<b>DECANO DEL MEDIO UNIVERSITARIO:</b>	<b>P. SERGIO BERNAL RESTREPO S. J.</b>
<b>DIRECTOR DE CARRERA:</b>	<b>Ing. JAIRO HURTADO LONDOÑO Ph.D.</b>
<b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO:</b>	<b>Ing. GABRIEL PERILLA GALINDO, M.Sc.</b>

## **NOTA DE ADVERTENCIA**

### **ARTÍCULO 23 DE LA RESOLUCIÓN N° 13 DE JUNIO DE 1946**

“La universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de grado. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque los trabajos no contengan ataques o polémicas puramente personales. Antes bien que se vea en ellos el anhelo de buscar la verdad y la justicia”

*Agradezco a Dios por darme las capacidades y permitirme llegar a este momento logrando realizar este trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico.*

*A mi familia que siempre ha creído en mí, me ha apoyado en cada momento y decisión de mi vida, a mi padre por su colaboración, ánimo y enseñarme a hacer las cosas lo mejor posible, a mi madre por ser un ejemplo de vida, enseñarme a nunca rendirme y dar lo mejor de mí siempre, a mis hermanas por las palabras de aliento, cariño y estar a mi lado cuando más las he necesitado. A mi abuela, tías y primas por su preocupación, cariño y motivación.*

*A todos los profesores que durante el transcurso de estos años me han brindado su conocimiento y amistad dándome herramientas para crecer como ingeniero y ser humano.*

*A mis amigos por su cariño, motivación, consejos y estar a mi lado en los momentos más duros.*

*A mis compañeros por brindarme opiniones y colaboraciones para hacer cada vez mejor las cosas y a las demás personas que se vieron vinculadas de una u otra forma para culminar este trabajo de grado.*

*Muchas Gracias, Dios los bendiga.*

***Marco Antonio Caipe-Balcázar***

*Quiero agradecer a nuestras familias por brindarnos todo el apoyo durante el desarrollo del trabajo. A mis padres por todo el esfuerzo que han hecho para permitir que muchos de mis sueños se hagan realidad. A Javier Rodríguez por su colaboración en nuestro proyecto. A profesores, compañeros y amigos que apoyaron esta experiencia. A las personas que trabajan en el laboratorio de electrónica. Finalmente a nuestro director de trabajo de grado Ing. Gabriel Perilla Galindo el cual nos ha introducido en un tema actual y de interés mundial, por su calidez humana y profesionalismo.*

***Andrés Felipe Celis P.***

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1	OBJETIVOS .....	10
1.1.1	Objetivo General.....	10
1.1.2	Objetivos Específicos .....	10
2.	MARCO TEÓRICO .....	11
2.3	Radiación Solar .....	12
2.4	Ángulos de referencia.....	12
2.4.1	Angulo de inclinación.....	12
2.4.2	Angulo Acimutal .....	12
2.5	Movimiento terrestre .....	13
2.6	Carta Solar.....	14
2.7	Convertidor DC/DC .....	15
2.8	Sistema de control de lazo abierto.....	15
2.9	Comunicaciones .....	16
2.9.1	Comunicación inalámbrica .....	16
3.	DESCRIPCIÓN GENERAL Y ESPECIFICACIONES.....	18
3.1	Diagrama y descripción General del sistema .....	19
4.	DESARROLLO.....	20
4.1	Diseño de la estructura y engranajes. ....	20
4.1.1	Cálculo de fuerzas que afectan la instalación. ....	22
4.2	Elección de motores y engranajes .....	25
4.4	Interfaz de usuario.....	32
4.4.1	Programación Interfaz de usuario .....	33
4.5	Control Motores. ....	35

4.5.1	Programación Control de Motores.....	38
4.6	Transmisión y recepción de datos .....	40
5.	PRUEBAS Y RESULTADOS .....	42
5.1	Movimiento y posicionamiento.....	42
5.2	Comunicación .....	45
5.3	Cargador de Batería.....	46
6.	CONCLUSIONES.....	50
7.	REFERENCIAS .....	52
8.	ANEXOS.....	53
A.	Hojas de especificaciones y artículos de componentes utilizados. ....	53
B.	Información sobre los módulos Xbee.....	53
C.	Códigos de programa y librerías. ....	53
D.	Código Interfaz usuario. ....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Curva I-V de una célula fotovoltaica cuando se encuentra en la oscuridad e iluminada.....	11
Figura 2.	Definición del ángulo de inclinación y azimut .....	13
Figura 3.	Movimientos de la tierra respecto al sol. [4].....	13
Figura 4.	(a) Grafica de declinación solar respecto al plano Ecuatorial de la tierra (b) Altura solar durante el año [5].....	14
Figura 5.	Carta Solar Pontificia Universidad Javeriana meses de Diciembre-Junio [18] .....	15
Figura 6.	Diagrama general de bloques de un sistema de control de lazo abierto.....	16
Figura 7.	Diagrama general de bloques de un sistema de comunicación.....	16
Figura 8.	Diagrama de fuerzas del sistema.....	24
Figura 9.	Modo de trabajo del dispositivo BQ24650 .....	27
Figura 11.	Esquemático del circuito cargador de batería. ....	31

Figura 12. Interfaz de Usuario.....	32
Figura 13. Diagrama de flujo Interfaz usuario. ....	34
Figura 14. Diagrama de flujo programa motores. ....	40
Figura 15. Posición inicial para movimiento de inclinación. ....	42
Figura 16. Posición inicial movimiento acimutal.....	44
Figura 18. Tramas captadas por el <i>sniffer</i> . ....	46
Figura 19. Respuesta con problemas en comunicación.....	46
Figura 20. Sugerencia para solucionar el problema de arranque del circuito.....	47
Figura 21. Gráfica del voltaje de carga sobre la batería Canal A V/Div:1V;Tiempo Total:6Horas, Canal B: V/Div: 500mV .....	48
Figura 22. Señales de control que reciben los GATES de los Transistores Q1A y Q2A de la figura 14. a) V/div: 1V T/div: <b>500ns</b> ; b) V/div: 5V T/div T/div: <b>1μs</b> .....	48
Figura 23. Circuito para deshabilitar la etapa de precarga. ....	49

### LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Redes y Tecnologías Inalámbricas aprobadas por la IEEE 802 [13] .....	17
Tabla 2. Especificaciones del motor .....	25
Tabla 3. Conexiones del microcontrolador interfaz de usuario.....	33
Tabla 4. Secuencia de movimiento del motor. ....	39
Tabla 5. Parámetros utilizados durante la configuración .....	41
Tabla 6. Secuencia de movimiento de inclinación, sentido horario con desplazamientos de 1° .....	43
Tabla 7. Secuencia de movimiento de inclinación, sentido anti horario con desplazamientos de 1° .....	43
Tabla 8. Secuencia de movimiento acimutal, en ambos sentidos con desplazamientos de 5°. ....	44

## 1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de nuevas fuentes de energía por medio del aprovechamiento de recursos renovables, ha llevado al desarrollo de sistemas que prometen una producción más eficiente. Las energías renovables tienen como objetivo disminuir la producción de gases efecto invernadero como el dióxido de carbono, metano, óxidos nitrosos, entre otros, creados en procesos de transformación de energía. Estos tienen efectos nocivos para el medio ambiente. Por lo tanto, el compromiso ambiental hace que gobiernos a nivel mundial busquen políticas que favorezcan este tipo de aplicaciones para la generación de energía eléctrica.

En Colombia se busca promover la creación de plantas energéticas con recursos renovables, principalmente recursos hídricos. Aunque, otras alternativas como sistemas eólicos y fotovoltaicos, aún no cuentan con el apoyo gubernamental para permitir el crecimiento del sector. A pesar de que las hidroeléctricas usan un recurso renovable como el agua, son criticadas por grupos ambientalistas debido a la transformación que sufre un ecosistema al crear una represa donde miles de hectáreas son inundadas desplazando flora y fauna [1].

La red eléctrica actual cubre una gran extensión del territorio en el país, sin embargo hay poblaciones remotas que no cuentan con este servicio debido al alto costo que implica. Es ahí donde la energía solar fotovoltaica provee una solución permitiendo mejorar la calidad de vida de los habitantes en zonas aisladas.

Los módulos fotovoltaicos convierten la energía proveniente del sol en energía eléctrica. Este efecto se da por el movimiento de electrones en los materiales fotosensibles con los cuales son fabricadas las células solares. La radiación solar depende de la ubicación geográfica. Por tal motivo se deben tener en cuenta algunos aspectos para decidir el lugar óptimo para realizar una instalación fotovoltaica. Por ejemplo, presencia de sombras, inclinación respecto a la horizontal, orientación respecto al sur (En lugares ubicados en el hemisferio norte), la temperatura ambiente, limitaciones arquitectónicas, entre otras [2].

Las instalaciones fotovoltaicas con estructuras móviles ofrecen una mejora en la producción de energía hasta un 48%<sup>1</sup> con respecto a instalaciones hechas con estructuras fijas. Dichas estructuras son sistemas electromecánicos que tiene como ideal buscar que el módulo esté expuesto perpendicularmente a los rayos solares la mayor parte del día para mejorar la capacidad de producción de energía del mismo. Comercialmente se encuentran estructuras de uno o dos ejes las cuales varían sus precios de acuerdo a la capacidad que estas tengan y el tipo de mecanismos que posean.

---

<sup>1</sup> Extraído del curso fotovoltaico Universidad Politécnica de Valencia. (6,32). 2010

Este proyecto tiene como objetivos: 1. El diseño de una estructura móvil electromecánica con dos grados de libertad (Inclinación y Acimutal) para un módulo solar. 2. Desarrollar un cargador solar de baterías para el sistema encargado del movimiento de la estructura. 3. La construcción de una interfaz de usuario para controlar los movimientos de la estructura utilizando comunicaciones inalámbricas.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo General**

- Diseñar y montar una estructura móvil con dos grados de libertad para panel solar, cuya posición es establecida por un usuario remoto.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Diseñar la estructura con dos grados de libertad que soporte apropiadamente el panel solar y cubra los ángulos de interés para el aprovechamiento máximo de la energía durante el día.
- Diseñar un convertidor DC/DC con el fin de almacenar parte de la energía producida por el panel en una batería, la cual alimentará el sistema.
- Diseñar una interfaz de posición manual que permita al usuario establecer valores de ángulos en la estructura del panel para los dos grados de libertad.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Módulo solar fotovoltaico

Un módulo solar es la interconexión de varias células fotovoltaicas conectadas en serie para mejorar las características eléctricas del sistema. Dependiendo del número de células solares interconectadas el panel solar se clasifica por la potencia, tensión y corriente. Las células fotovoltaicas son dispositivos capaces de convertir directamente la radiación solar en energía eléctrica dependiendo de la respuesta espectral de los materiales fotosensibles que las constituyen. Las células fotovoltaicas poseen una unión p-n que trabaja en el cuarto cuadrante del plano cartesiano, es decir, que sobre esta región la unión es capaz de generar energía (ver figura 1). El resultado en la salida de una célula solar fotovoltaica es una señal de voltaje continuo DC y una corriente continua DC cuando se encuentra conectado a una carga [2].

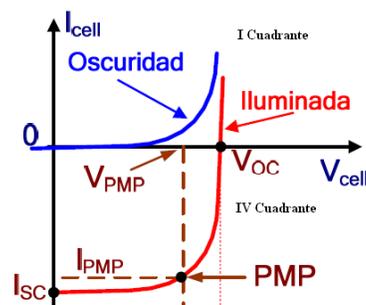


Figura 1. Curva I-V de una célula fotovoltaica cuando se encuentra en la oscuridad e iluminada.

### 2.2 Estructura para instalaciones fotovoltaicas

Las estructuras para instalaciones fotovoltaicas se diseñan con el fin de optimizar la energía generada por los módulos fotovoltaicos, para ello, la orientación y la inclinación deberían ser óptimas. Para esto se requiere una estructura de soporte que se adapte a la superficie que sostendrá el sistema fotovoltaico. Las estructuras pueden ser fijas o móviles, de uno o dos ejes.

Las estructuras de soporte deben resistir durante toda la vida útil de la instalación fotovoltaica el peso de los módulos así como las sobrecargas producidas por el viento y la nieve en caso de haberla, soportando las dilataciones térmicas de diversos elementos sin provocar tensiones y esfuerzos mecánicos. [2]

Los objetivos de las estructuras en instalaciones fotovoltaicas son:

- Asegurar estabilidad y agarre del sistema.

- Transmitir las fuerzas externas sobre la instalación a los elementos constructivos que soportan la estructura.
- Proporcionar los ángulos de orientación (inclinación y azimut) apropiados.

### 2.3 Radiación Solar

Es el flujo de energía procedente del sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias. Cubre un rango en el espectro electromagnético cuyas longitudes de onda van desde  $0,1 \mu m$ . hasta  $10 \mu m$ . como; ultravioleta, visible e infrarrojo. Se pueden identificar diferentes tipos de radiación, dependiendo de la radiación solar recibida por un objeto ubicado en la superficie terrestre:

- a) radiación directa: Es aquella que llega directamente del sol a una superficie sin haber sufrido dispersión en su trayectoria al atravesar la atmosfera. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.
- b) radiación difusa: Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera y es reflejada por las nubes o absorbida por éstas, partículas de polvo en la atmosfera, montañas, árboles, edificios, el suelo, etc.
- c) radiación reflejada: es aquella que es reflejada por la superficie terrestre, depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también conocido como albedo. Las superficies verticales son las que reciben generalmente este tipo de radiación.
- d) radiación global: Es la suma de los tres tipos de radiaciones anteriores [2].

### 2.4 Ángulos de referencia

#### 2.4.1 Angulo de inclinación

Es el ángulo que forma la superficie de un panel fotovoltaico con el plano horizontal. En la figura 2 (a) se muestra este ángulo que por lo general se denota en la bibliografía como  $\beta$ .

#### 2.4.2 Angulo Acimutal

Es el ángulo formado entre el eje Norte-Sur y la superficie de un modulo solar fotovoltaico, el cual tiene un valor positivo en sentido horario y negativo en sentido anti-horario. En la figura 2 (b) muestra un ángulo  $\alpha = +45^\circ$ .

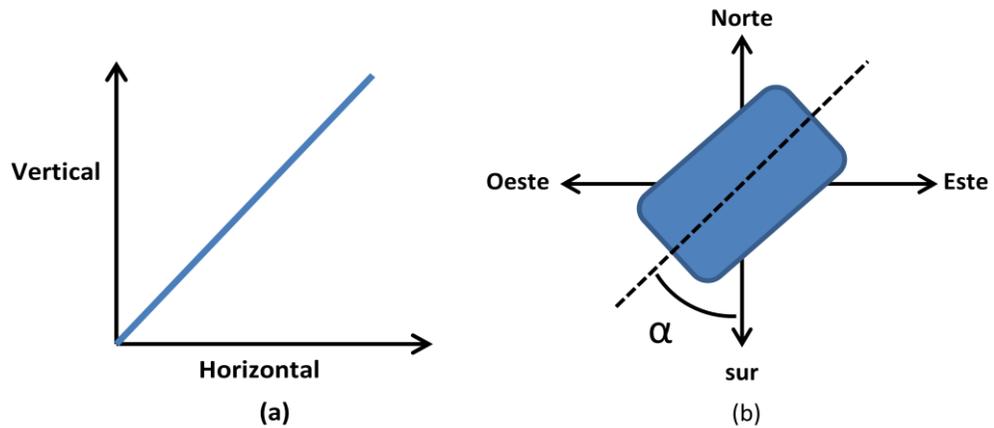


Figura 2. Definición del ángulo de inclinación y azimut

## 2.5 Movimiento terrestre

El movimiento de rotación de la tierra ocurre sobre un eje imaginario que va del polo norte al polo sur generando el día y la noche. Mientras que en el movimiento de traslación, la tierra efectúa el seguimiento de un órbita elíptica durante un año alrededor del sol. El eje de rotación forma un ángulo de  $66^{\circ}33''$  respecto al plano de orbita denominado eclíptica, esto ocasiona que la exposición directa de la radiación solar sobre una superficie de la tierra sea variable durante el año especialmente en los hemisferios norte y sur del planeta ocasionando las estaciones. En la figura 3 se puede observar este comportamiento.

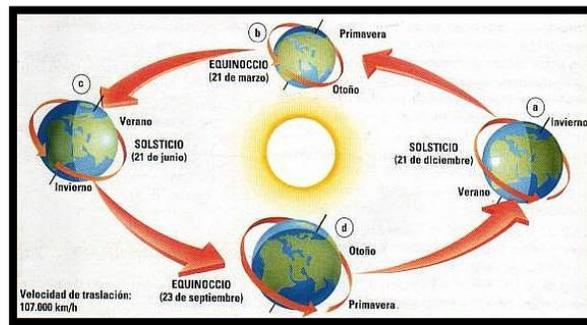
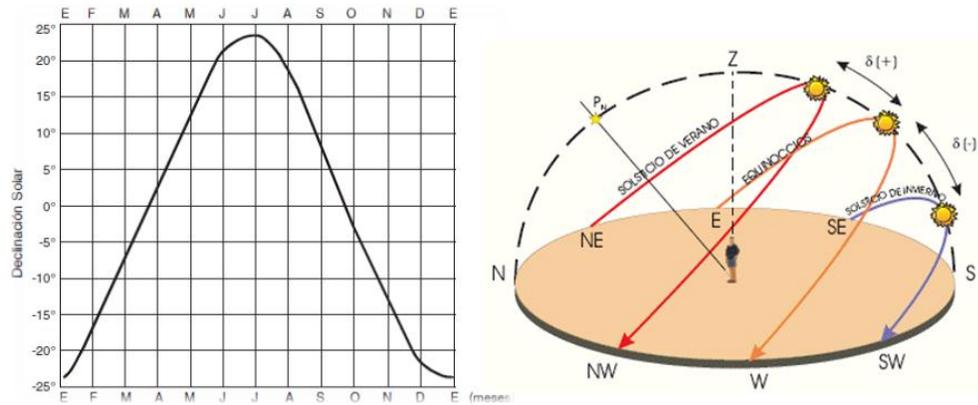


Figura 3. Movimientos de la tierra respecto al sol. [4]

Durante los equinoccios, épocas del año con una declinación solar igual a cero, (ver figura 4(a)) los días tienen la misma duración que las noches en toda la tierra, esto ocurre en los meses de abril o septiembre. En el solsticio (la declinación solar es de  $\pm 23^{\circ}26'$ ), ocurre en los meses de Diciembre o Junio el sol varia su altura, lo que implica que durante el invierno en el hemisferio norte la radiación solar directa produce más sombra cuando el sol se está ocultando. En el verano las sombras se reducen al mínimo en horas del mediodía. En la figura 4 se puede observar la variación del ángulo de declinación durante los meses del año respecto al plano ecuatorial.



**Figura 4. (a) Grafica de declinación solar respecto al plano Ecuatorial de la tierra (b) Altura solar durante el año [5]**

En la figura 4 (b) se observa cómo es la percepción de la altura solar durante el año.

Por lo tanto la energía efectiva que recibe una superficie varía durante el año. Para aplicaciones con módulos solares es difícil escoger un solo punto óptimo de inclinación que cumpla con todas las situaciones durante el transcurso del año. Por lo que hay que tener en cuenta la información de la energía que puede captar una superficie con estos cambios. [2]

## 2.6 Carta Solar

La carta solar muestra la posición estimada del sol con respecto al ángulo acimutal y al ángulo de inclinación sobre el horizonte. Con la carta solar es posible determinar la trayectoria que tiene el sol durante el año a determinada hora. Es necesario realizar la gráfica de la carta solar (figura 5) con las coordenadas del lugar de la instalación para tener con mayor certeza el recorrido. La Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá se encuentra en las coordenadas: Latitud: 4.6289 °N, Longitud: 74.0648 °W.

Por ejemplo si se desea conocer la posición del sol en las coordenadas de la instalación, se ubica el mes del año y la hora correspondiente. En la figura 5 se ubica el punto en el cual el sol se encuentra durante el mes de mayo a las 11:00 a.m. De acuerdo con la carta solar el sol tendrá una inclinación de 75° y un ángulo de azimut de 105° aproximadamente.

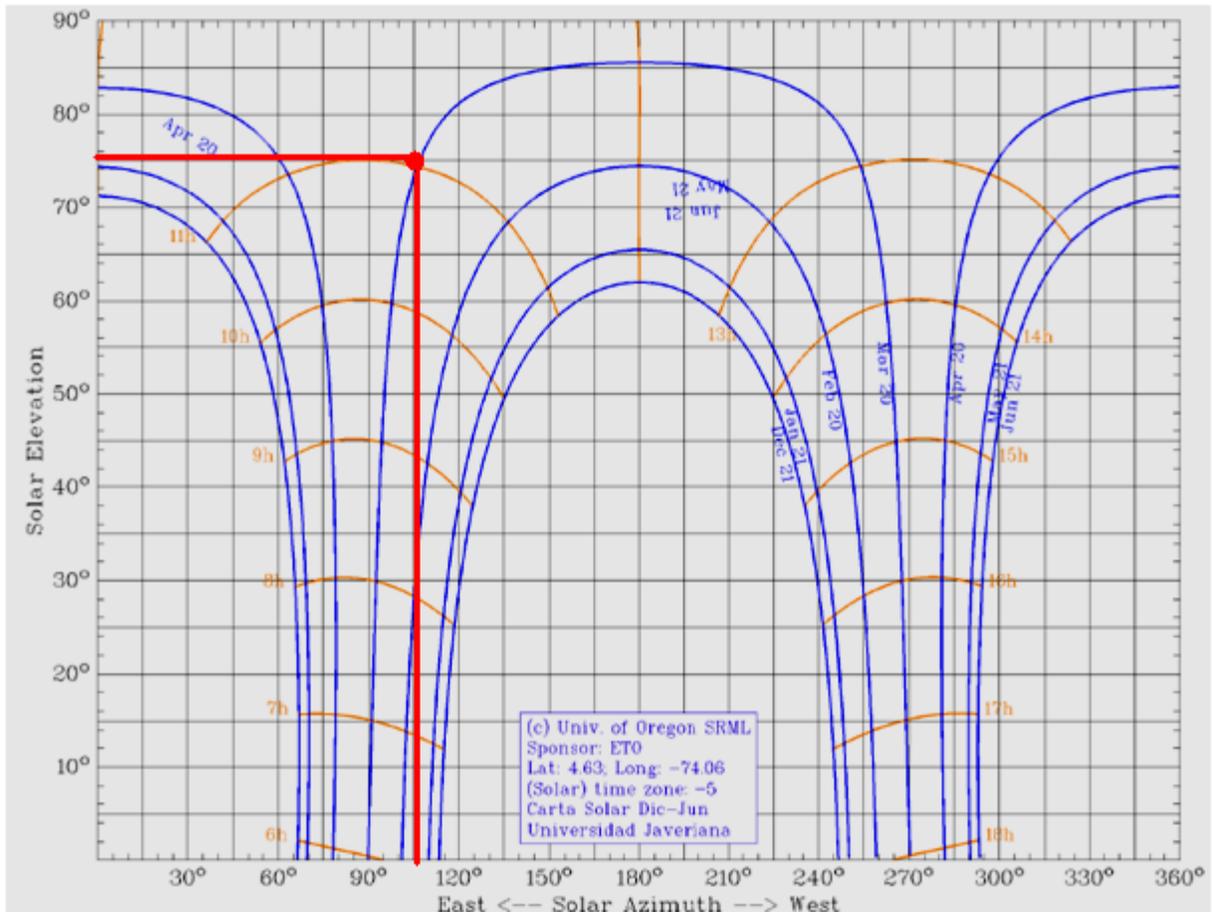


Figura 5. Carta Solar Pontificia Universidad Javeriana meses de Diciembre-Junio [18]

## 2.7 Convertidor DC/DC

El cargador solar de baterías es un sistema que permite adaptar las condiciones de la señal de corriente continua a la salida de un sistema fotovoltaico para almacenar energía en baterías. Los sistemas fotovoltaicos normalmente operan con un rango de variaciones a la entrada que, en consecuencia, representa variaciones en la salida del mismo. Un cargador solar permite que estas condiciones se optimicen, lo que significa que las condiciones ideales se presentan cuando el cargador solar limita el rango de entrada-salida del sistema y trabaja la celda fotovoltaica en el punto máximo de potencia. Por lo general, un cargador solar es un convertidor DC/DC controlado por conmutación. Existen diferentes tipos de topologías basadas en la conmutación de dispositivos para realizar los convertidores DC/DC como por ejemplo *buck*, *boost*, *buck-boost*. O un cargador de tipo *ON-OFF* [2].

## 2.8 Sistema de control de lazo abierto

Es un sistema en el que actúa un proceso sobre la señal de entrada y da como resultado una señal de salida. Es decir, que la única referencia que tiene el controlador para efectuar cualquier cambio en el sistema depende de la señal de entrada [3].

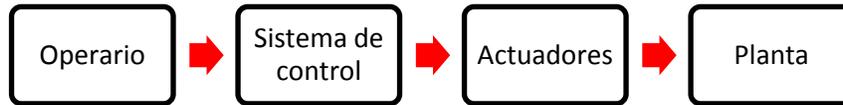


Figura 6. Diagrama general de bloques de un sistema de control de lazo abierto

## 2.9 Comunicaciones

La comunicación es la transferencia de información de un lugar a otro, la información que se transmite es el mensaje. El diagrama de bloques de la figura 7, muestra un modelo básico de los componentes de un sistema de comunicaciones, del cual hacen parte un emisor o sistema origen; el cual envía un mensaje, y el canal o medio de transmisión por el cual se enviará el mensaje, y finalmente se encuentra el receptor del mensaje o sistema destino, el cual recibe el mensaje [4].

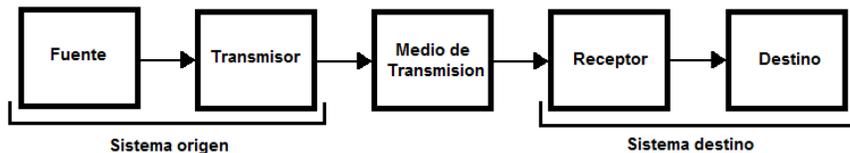


Figura 7. Diagrama general de bloques de un sistema de comunicación.

### 2.9.1 Comunicación inalámbrica

La comunicación inalámbrica está reglamentada por la IEEE en el artículo 802. En una aplicación, el tipo de estándares debe ser de acuerdo a la exigencia de la aplicación, desde la potencia de la señal, la distancia que se desea cubrir. En el artículo IEEE 802 se encuentran algunos estándares dependiendo del área de cubrimiento, ver tabla 1. [6]

<b>Nombre</b>	<b>Distancia Máxima</b>	<b>Tecnología utilizada</b>
WPAN	Decadas de metros	Bluetooth Zigbee HomeRF RFID
WLAN	Cientos de metros	HiperLAN
WMAN	Kilometros	WiMAX

**Tabla 1. Redes y Tecnologías Inalámbricas aprobadas por la IEEE 802 [5]**

Para este proyecto la aplicación usada es la ZigBee, ya que se busca evitar el tránsito sobre el manto que protege la filtración de agua en la terraza del edificio de ingeniería de la PUJ. Además es una aplicación de bajo costo y de fácil uso.

### 3. DESCRIPCIÓN GENERAL Y ESPECIFICACIONES

Este proyecto tiene como propósito desarrollar una estructura móvil con dos grados de libertad que permita el movimiento de un módulo solar fotovoltaico. Como se ha mencionado en el capítulo anterior, el objetivo de la estructura móvil está centrado en maximizar la producción de energía. Por esta razón, los requerimientos básicos del sistema son; la elaboración de la estructura y un sistema que permita controlar el movimiento de la estructura de manera remota. Adicionalmente, el sistema debe ser alimentado utilizando parte de la energía producida por el módulo solar.

**Estructura:** La estructura debe tener movimiento en dos ángulos de libertad que permita orientar el panel solar con un rango de variación en los ángulos inclinación y acimutal, con el fin de realizar mediciones de producción de energía del módulo durante el día en futuros proyectos.

**Sistema electromecánico:** Se deben seleccionar los motores adecuados y el mecanismo apropiado. Estos elementos deben soportar la carga del panel y otros factores externos.

**Batería:** Se debe seleccionar una batería adecuada de 12 VDC para la aplicación, que permita entregar la energía necesaria para el sistema de control y los actuadores que ejecutan el movimiento de la estructura.

**Convertidor DC/DC:** Este elemento se conecta entre los terminales del panel solar y la batería. Los objetivos de este deben ser controlar la carga de la batería y reducir el voltaje de carga ya que el panel solar con el que se cuenta entrega un voltaje máximo de 33 V.

Los módulos solares son sistemas que entregan voltaje y corriente continua. Debido a que la señal obtenida no es ideal, se debe diseñar un circuito que permita mejorar las condiciones de esta. Adicionalmente, ya que se tiene una instalación aislada el sistema debe tener un elemento que almacene energía para garantizar la alimentación del sistema que mueve la estructura. Por lo tanto, esa batería debe ser recargada de manera controlada de una manera eficiente y segura que permita una vida útil prolongada.

**Sistema de control:** En este proyecto de energía renovable se solicitó desarrollar un sistema de control de lazo abierto que permita posicionar los actuadores electromecánicos de la estructura móvil.

**Control remoto:** El usuario debe tener la posibilidad de realizar los cambios de ángulo en la estructura por medio de una interfaz remota, preferiblemente que tenga una conexión inalámbrica.

### 3.1 Diagrama y descripción General del sistema

A continuación en la figura 8 se observa el diagrama en bloques general del sistema. Este es un sistema auxiliar diseñado exclusivamente para el movimiento de la estructura.

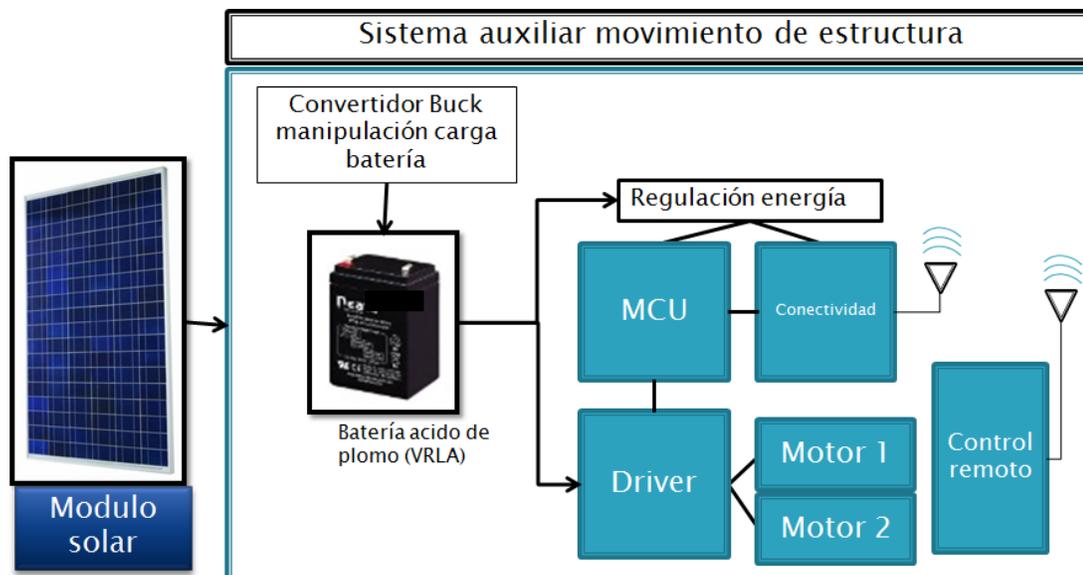
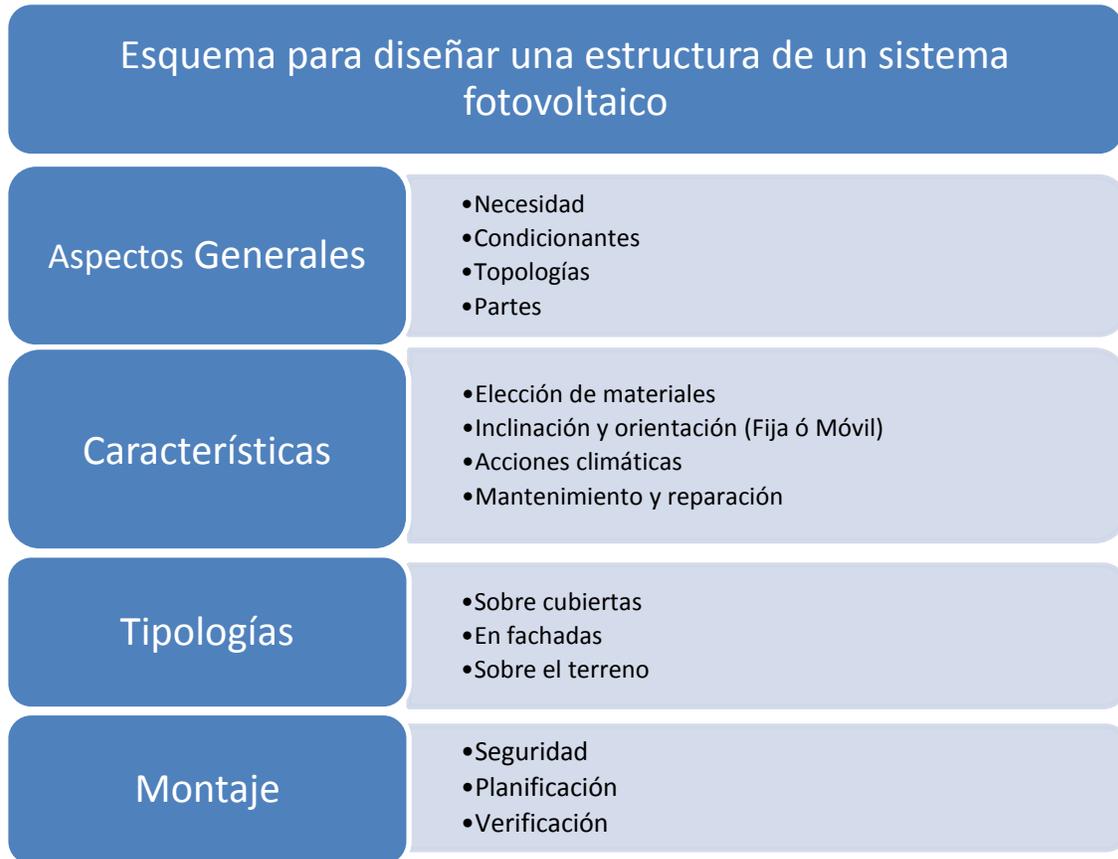


Figura 8. Diagrama general del sistema que está contemplado en este proyecto.

Las funciones principales del sistema de este proyecto son descritas a continuación. El módulo solar fotovoltaico es conectado a un convertidor *BUCK*, el cual sirve para recargar una batería de 12 V de manera controlada. A su vez, la batería alimenta el sistema de control, comunicación y los motores. El sistema de control está basado en el uso de microcontroladores (MCU), los cuales tienen dos funciones principales en el proyecto. La primera, es proveer las señales de control para efectuar el movimiento de los motores en la estructura. La segunda es permitir la comunicación entre el sistema de control y la interfaz de usuario. Los elementos encargados de la comunicación entre la interfaz de usuario y el sistema son conocidos como Xbee. La interfaz de usuario permite al usuario cambiar la orientación de la estructura para el módulo solar fotovoltaico de manera remota.

## 4. DESARROLLO

### 4.1 Diseño de la estructura y engranajes.



**Figura 9. Esquema para diseñar estructuras para sistemas fotovoltaicos.<sup>2</sup>[2]**

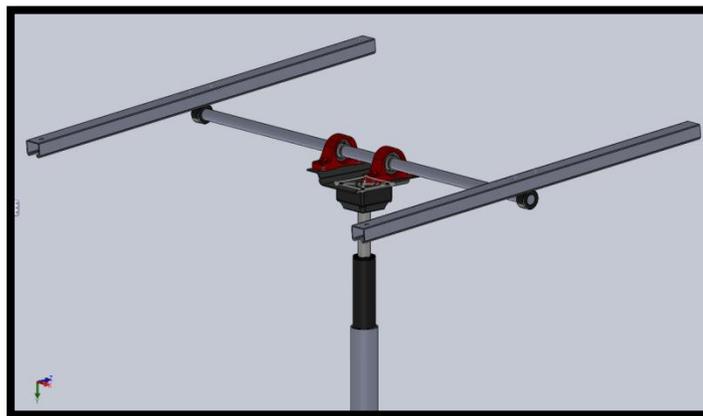
Existen diferentes factores que deben tenerse en cuenta en el diseño de estructuras para módulos fotovoltaicos tales como la necesidad, la topología, factores climáticos, etc. Para empezar, fue necesario realizar una evaluación del lugar donde se encuentra la instalación. Se evaluaron posibles sombras causadas por árboles, muros y edificios aledaños que pudieran afectar al sistema. Por tal motivo, se decidió que la mejor ubicación para la instalación es en el costado occidental del edificio de ingeniería en cambio del costado oriental, el cual es afectado por la sombra generada por el edificio que se ve en la figura 10 (b) gran parte de la mañana. Por otro lado, la figura 10 (a) muestra el lugar elegido para realizar la instalación.

<sup>2</sup> Tomado de Curso Fotovoltaico. Universidad Politécnica De Valencia.



(a) (b)  
**Figura 10. Imágenes de la terraza de la Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana.**

Criterios tales como protección, mantenimiento y costo, se utilizaron para seleccionar un montaje sobre un poste, como se muestra en la figura 11. Este tipo de montaje provee mejor protección a cualquier elemento eléctrico o mecánico de la lluvia, ya que estos elementos se encuentran distantes de algún punto donde se pueda acumular agua o recibir agua por salpicaduras. Además, este tipo de montaje permite realizar cualquier tipo de mantenimiento a la instalación fácilmente. Otro factor para escoger este tipo de montaje es que el número de materiales se reduce, disminuyendo el costo de la estructura en comparación con el precio de otras estructuras móviles en el mercado.



**Figura 11. Montaje sobre un poste, Bosquejo inicial de la estructura móvil con dos grados de libertad.**

Otro aspecto general que se debe tener en cuenta son los factores externos que afectan la instalación, especialmente climáticos. El factor externo que mayor influencia tiene sobre la estructura es la fuerza ejercida por el viento. Por lo tanto es necesario recurrir a información climática del lugar donde se desea

hacer el montaje en este caso, existe información disponible sobre las características climáticas de la ciudad<sup>3</sup>, anuales y mensuales.

#### 4.1.1 Cálculo de fuerzas que afectan la instalación.

##### 4.1.1. Fuerzas que afectan el ángulo Acimutal

Para que el sistema esté en equilibrio en la posición de acimut se deben cumplir las siguientes ecuaciones.

$$\sum F_y: N_o = w g \quad (1)$$

$$\sum F_x: F_v = F_{av} \quad (2)$$

Donde  $w$  es la masa del módulo solar más la base  $w = 28 \text{ kg}$ ,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  la constante de la gravedad. Por lo tanto resolviendo la ecuación 1 se obtiene que el valor de la fuerza normal  $N_o$  es,

$$N_o = 275 \text{ N}$$

Ahora para hallar el torque se multiplica la fuerza por la distancia  $d_e = 0,15 \text{ m}$  entre el mecanismo situado en el eje y el módulo solar.

$$\tau = N_o \times d_e \quad (3)$$

$$\tau = 41.16 \text{ N m}$$

##### Fuerza ejercida por el viento $F_v$ .

El viento ejerce una presión sobre los objetos que encuentra a su paso como edificios, árboles, mallas publicitarias, etc. Por lo tanto, la fuerza ejercida por el viento es definida como:

$$F_v = A * P \quad (4)$$

Donde,  $F$  es la resistencia al avance o ejercida por el viento,  $A$  es la proyección del área del frente de ataque y  $P$  es la presión del viento.

Para calcular la presión del viento se emplea la ecuación [13]:

$$P = (C_d * R_o * V^2)/2 \quad (5)$$

---

<sup>3</sup> [http://www.tutiempo.net/clima/Bogota\\_Eldorado/2012/802220.htm](http://www.tutiempo.net/clima/Bogota_Eldorado/2012/802220.htm). Sitio web relación con las condiciones climáticas de Bogotá

Donde,  $P$  es la presión del viento [ $N/m^2$ ],  $R_o$  la densidad del aire seco  $1.223 [kg/m^3]$ ,  $V$  la velocidad del viento [ $m/s$ ] y la constante  $C_d$ , coeficiente aerodinámico de resistencia al avance el cual para una superficie plana es de 1.17.

Suponiendo una velocidad del viento de  $30 [km/h]$ , ligeramente superior al valor máximo suministrado en<sup>1</sup>. Se tiene:

$$P = \frac{1.223 \frac{kg}{m^3} * (8.33 \frac{m}{s})^2 * 1.17}{2} = 49.52 N/m^2 \quad (6)$$

Las dimensiones del módulo son  $1661 \text{ mm} \times 991 \text{ mm}$ , con lo cual se obtiene un área  $A = 1.64 \text{ m}^2$ .

Para la velocidad supuesta del viento de  $30 \text{ km/hora}$ , la fuerza que ejercerá el viento si esta afecta toda la superficie del panel modulo solar será:

$$F_v = P * A = 81.52 \text{ N} \quad (7)$$

Realizando la sumatoria de fuerzas en  $x$ , La fuerza  $F_{av}$  (ver figura 12) es una fuerza que se opone a la fuerza  $F_v$ , para hallar el torque en este caso la distancia es la longitud del módulo solar dividido en dos  $d_l = 0.8m$ , ya que el sistema de movimiento se encontrará a la mitad del módulo fotovoltaico.

$$\tau = F_{av} \times d_l \quad (8)$$

$$\tau = 68 \text{ N m}$$

#### 4.1.1. Fuerzas que afectan el ángulo de inclinación

Para que el sistema (figura 12) esté en equilibrio para el ángulo de inclinación se debe cumplir la ecuación (9):

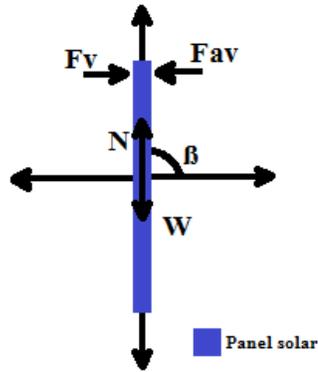


Figura 8. Diagrama de fuerzas del sistema.

$$\sum F_y: N_o = wg \quad (9)$$

La componente del peso del módulo solar, Normal ( $N_o$ ), sobre el eje “y” será mayor cuando el ángulo de inclinación  $\beta = 90^\circ$ , la componente sobre el eje “y” viene afectada por el seno del ángulo, para este caso  $\text{seno } 90^\circ = 1$ , en los demás casos el valor del seno será inferior a 1 y por consiguiente la componente del peso sobre el eje “y” será mayor cuando la normal coincide con el eje “y”, lo anterior implica que el mayor torque del motor se requerirá cuando el panel este completamente vertical.

$W$  es la masa del panel que corresponde a  $18 \text{ kg}$  y  $g$  es la constante de la gravedad  $9.81 \text{ m/s}^2$ .

$$N_o = 176.4 \text{ N}$$

Una vez conocida esta fuerza, se debe calcular la fuerza necesaria para sacar al sistema de su momento de equilibrio, la ecuación (10) permite calcular la fuerza de rotación que se requiere para desplazar el módulo fotovoltaico.

$$\tau = N_o \times d_a \quad (10)$$

Donde la distancia  $d_a = 0,495 \text{ m}$  corresponde a la mitad del ancho del módulo solar, ya que el sistema de movimiento se encontrara a la mitad del módulo fotovoltaico.

$$\tau = 176.4 \text{ N} * 0.495 \text{ m}$$

$$\tau = 87.4 \text{ N m}$$

## 4.2 Elección de motores y engranajes

Para la aplicación, se seleccionó un motor híbrido de paso porque este tipo de motor permite implementar sistemas de precisión incluso con controladores a malla abierta. Adicionalmente, se encuentran motores que pueden aplicar la fuerza requerida. Las características del motor se encuentran en la tabla 2.

Model	Step Angle	Motor Weight	Rate Voltage	Rate Current	Holding Torque	Lead wire
85BYGH450C-012	1,8	5 kg	5 v	3 A	11.5 Nm	4

Tabla 2. Especificaciones del motor

Uno de los criterios que se tuvo en cuenta para el desarrollo del control de los motores y fabricación de los engranajes, fue evitar el uso de decimales en el conteo de pasos, con el fin de no perder precisión luego de un número determinado de movimientos. El motor **85BYGH450C-012** desplaza su eje  $1.8^\circ$  por cada paso. Por lo tanto, si se multiplica el ángulo por paso por múltiplos de cinco se obtienen números enteros (9,18,27...). Entonces, se tiene como referencia para la elección de los engranajes que con una relación de transmisión ( $R_T$ ) de 9:1 el engranaje conductor denominado como B en la figura 13 se desplaza  $1^\circ$  por cada cinco pasos ó  $9^\circ$  de desplazamiento en el motor.

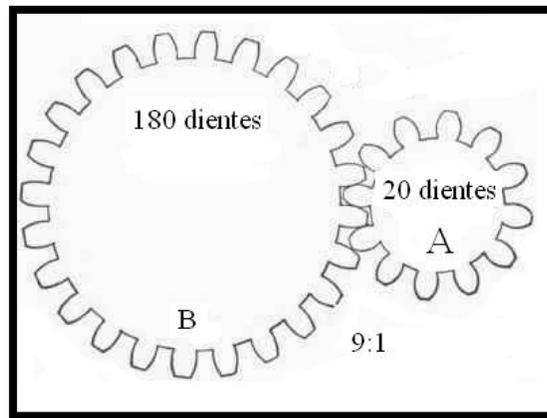


Figura 9. Relación entre Engranajes<sup>4</sup>

$$R_T = \frac{Z_B}{Z_A} = \frac{180}{20} = \frac{9}{1} \quad (11)$$

Donde Z Corresponde al número de dientes de cada uno de los engranajes. La relación de transmisión para el número de dientes se describe en la ecuación (11).

<sup>4</sup> Figura Tomada y modificada de <http://www.mechanical-toys.com/gears.htm>

$$R_T = \frac{\tau_B}{\tau_A} \quad (12)$$

La ecuación 12 sirve para calcular la relación de transmisión con respecto al torque para dos engranajes circulares de dientes planos.

Donde  $R_T = 9$  y  $\tau_A = 11.5 \text{ Nm}$  corresponde a “*holding torque*”, Por lo tanto,  $\tau_B = 103.5 \text{ Nm}$ . De acuerdo a los resultados obtenidos en las ecuaciones (3) y (10), con esta relación de potencia se obtiene el torque necesario para realizar el movimiento de los ángulos de inclinación y azimut.

Respecto a la velocidad de rotación del sistema se desea que este gire con una velocidad angular  $\omega_B = 1 \text{ rpm}$ . Con la ecuación 13 se calcula la relación de transmisión con respecto a las velocidades angulares de dos engranajes de diente planos.

$$R_T = \frac{\omega_A}{\omega_B} \quad (13)$$

$$\omega_A = (1 \text{ rpm}) * 9 = 9 \text{ rpm}$$

Para que el motor realice un desplazamiento de  $360^\circ$  son requeridos 200 pasos. Para obtener una  $\omega_A$  de 9 rpm en el motor se requieren 1800 pasos. Lo que da como resultado, que el tren de impulsos de corriente que se debe aplicar al motor híbrido de pasos debe tener una frecuencia de 30 Hz para cumplir con esta condición de velocidad angular. Es decir, debe haber un pulso de corriente cada 33,3 ms.

### 4.3 Cargador de baterías

El diseño del cargador de la batería está basado en el circuito integrado BQ24650 fabricado por Texas Instruments. Este circuito integrado es un control para recargar baterías por conmutación con una frecuencia de 600 kHz. “*El cual regula el voltaje de entrada y reduce la corriente de carga cuando el voltaje de carga cae por debajo del nivel programado. Por ejemplo, cuando la entrada es alimentada por un panel solar el lazo de control disminuye la corriente de carga lo que permite al panel solar desarrollar el punto máximo de potencia*”<sup>5</sup>.

En la figura 14 se muestra el modo de trabajo del dispositivo BQ24650. El circuito integrado (IC) carga la batería en tres fases. La primera es llamada precarga, en esta fase se aplica una corriente constante

---

<sup>5</sup> Ver datasheet SLUSA75, Synchronous Switch-mode Battery charge controller for solar power with maximum power point tracking (BQ24650). Texas Instruments. Julio 2010.

aproximadamente diez veces menor a la corriente de carga programada. Ocurre cuando el voltaje de realimentación en el PIN  $V_{FB}$  está por debajo 1.5V. Una vez  $V_{FB}$  sobrepasa los 1.5 V, empieza el segundo modo de carga el cual consiste en aplicar corriente constante, la cual es programada a través de la resistencia  $R_{SR}$ , hasta que la batería alcance el voltaje máximo deseado. Por último, una vez  $V_{FB} = 2.1 V$  la corriente de carga empieza a disminuir gradualmente mientras el voltaje aplicado a la batería se mantiene constante.

### Modo de trabajo del Dispositivo BQ24650

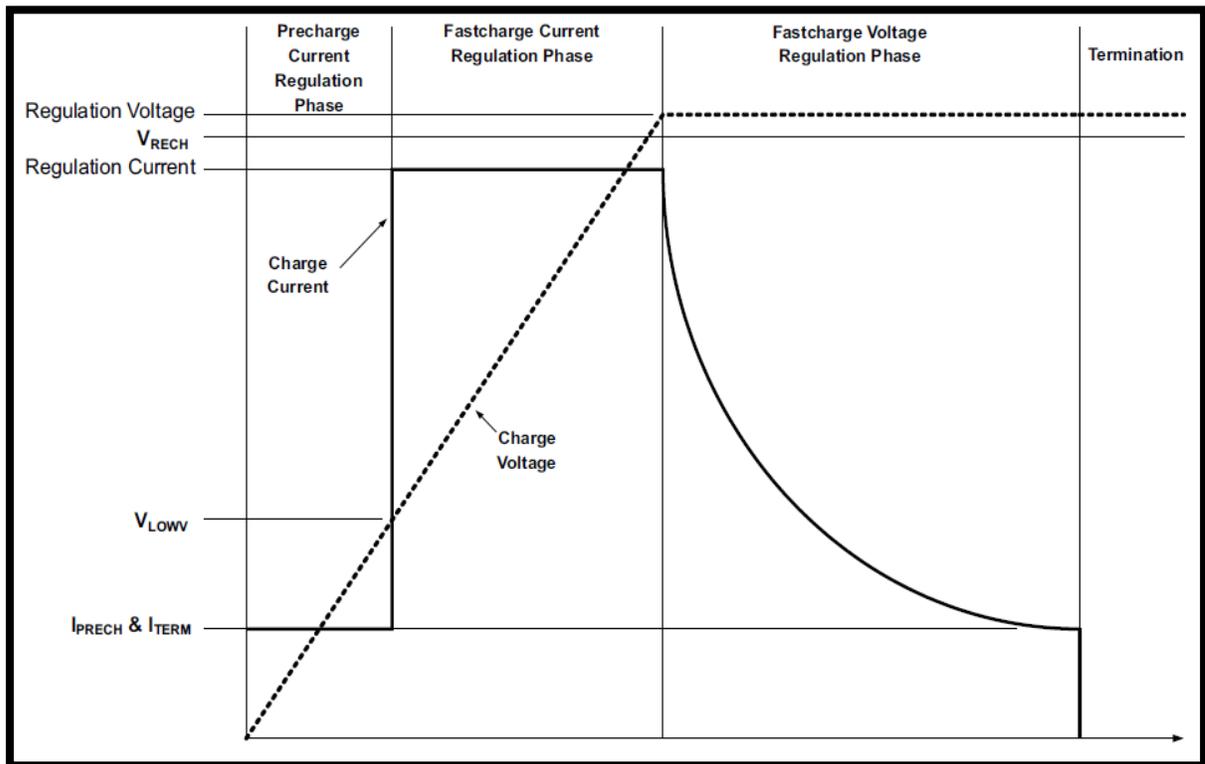


Figura 9. Modo de trabajo del dispositivo BQ24650<sup>6</sup>

#### 4.3.1 Regulación del voltaje de entrada

Este pin tiene como función programar el (*MPPT*) *maximum point power tracking*<sup>7</sup>, el cual es máximo punto de eficiencia de un módulo solar fotovoltaico. El IC tiene programado un algoritmo para buscar el MPPT conocido como voltaje constante. El valor de entrada se programa con un divisor de voltaje entre el

<sup>6</sup> Figura tomada de datasheet SLUSA75, (BQ24650) página 12. Texas Instruments. Julio 2010.

<sup>7</sup> El MPPT es una función deseable para toda aplicación con energía solar fotovoltaica para aprovechar al máximo la capacidad de producción de los módulos fotovoltaicos. Para la aplicación presentada en este documento, esta característica es utilizada para entender los principios de funcionamiento de esta función.

punto de entrada y tierra, el punto medio del divisor es conectado al PIN MPPSET es cual es regulado a 1.2 V. Por lo tanto, el objetivo de este método, es mantener un voltaje constante, mientras se regula la corriente para que la potencia suministrada sea máxima.

$$V_{MPPSET} = 1.2 V * \left(1 + \frac{R_7}{(R_8 + R_{10})}\right) \quad (14)$$

Donde,  $V_{mppset} = 28.9 V$ ,  $R_7 = 470 k\Omega$  y  $R_8 = 20 k\Omega$ ,  $R_{10} = 5 k\Omega$ . Se eligió  $R_{10}$  como una resistencia variable con el fin de ajustar el voltaje de entrada en el valor deseado.

### 4.3.2 Regulación de la corriente máxima de carga

Esta ecuación permite determinar el valor de la resistencia de sensado entre los puntos SRP y SRN. Internamente SRP y SRN corresponden a la entrada a un amplificador que compara la diferencia de voltaje sobre la resistencia  $R_{SR}$  amplificada por veinte veces con un voltaje de 0.8, con el fin de limitar la corriente de carga del circuito, es decir que si la diferencia de voltaje sobre  $R_{SR} > 40mV$  la señal de error es afectada y el integrado es obligado a reducir el ciclo útil del control. Este valor debe ser escogido con referencia a la hoja de especificaciones de la batería para no exceder el valor máximo permitido.

$$R_{SR} = \frac{40mV}{1,2A} = 0,033 \Omega \quad (15)$$

En este caso el valor máximo de corriente permitido es 1,2 A, lo que indica que se debe poner una resistencia de sensado  $R_{SR} = 0,033 \Omega$ .

### 4.3.3 Voltaje de regulación de la batería.

El voltaje de regulación se programa por medio de un divisor de voltaje conectado al punto  $V_{FB}$  del integrado, el cual es regulado en 2.1 V. La resistencia  $R_a$  se conecta del punto positivo de la batería al punto  $V_{FB}$ , mientras que la resistencia  $R_b$  se conecta entre el punto  $V_{FB}$  y tierra<sup>8</sup>.

$$V_{BAT} = 2.1 V * \left(1 + \frac{R_a}{R_b}\right) \quad (16)$$

El fabricante Texas Instruments, sugiere una modificación al esquemático básico del cargador solar cuando son utilizadas baterías selladas de ácido de plomo<sup>9</sup>. De acuerdo con el fabricante, esta modificación permite controlar la corriente de carga respecto a la temperatura de la batería de una manera

<sup>8</sup> Ver datasheet SLUSA75, (BQ24650) página 12. Texas Instruments. Julio 2010

<sup>9</sup> Ver Application Report SLVA437. Using the BQ24650 to charge a sealed, lead-acid battery.

más efectiva. Por lo tanto, el divisor resistivo  $R_a$  y  $R_b$  con el cual es programado el voltaje máximo de carga es reemplazado por algunos componentes activos y pasivos.

$$V_{BAT} = V_{REF} * \left( 1 + \frac{(R_{15}+R_{17})+(R_{16}||R_{TC})}{R_{14}||R_{13}} \right) \quad (17)$$

Es utilizado un termistor NTC  $R_{TC} = 47 \text{ k}\Omega$ <sup>10</sup>. El cual es un termistor de coeficiente negativo, es decir, que el valor de su resistencia es inversamente proporcional a la temperatura. El objetivo de este dispositivo es suspender la corriente de carga cuando la temperatura de la batería excede el valor apropiado de temperatura<sup>11</sup>. Por lo tanto, a medida que la temperatura en la batería aumenta, el termistor disminuye el valor de su resistencia, lo cual aumenta el voltaje en el punto  $V_{FB}$ . Una vez el voltaje en este punto supera los 2.1 V la corriente de carga de la batería es suspendida.

#### 4.3.4 Condensador e inductancia de salida

Debido a que el IC BQ24650 tiene una frecuencia de conmutación de 600 kHz. El valor de los componentes pasivos  $L$  y  $C_{out}$  con los cuales se diseña el filtro pasa-bajos de la fuente BUCK puede ser del orden de micros, disminuyendo el tamaño y precio de los componentes.

La inductancia se calcula en función del rizado máximo deseado a la salida y el ciclo útil de trabajo.

$$I_{rizado} = \frac{V_{in} * D * (1-D)}{f_s * L} \quad (18)$$

$$L = \frac{28.9 * 0.5 * (1 - 0.5)}{600 \text{ kHz} * 0.34} \approx 35 \mu\text{H}$$

*“Por lo general se desea que el rizado se diseña entre el 20-40% de la corriente máxima de carga para tener un equilibrio entre el tamaño de la inductancia y la eficiencia del circuito”*<sup>12</sup>.

Para calcular el condensador de salida  $C_{out}$  (C9 en Figura 11) se tienen en cuenta dos ecuaciones. El fabricante recomienda que el filtro de salida (el filtro de salida es conformado por L1 y C9 en la figura 11) tenga una frecuencia  $f_r$  entre 12 kHz y 17 kHz, debido a que la compensación en la etapa de entrada conectada directamente a la salida requiere un valor entre este rango<sup>13</sup>. La frecuencia de resonancia se define en la ecuación 17, donde  $L = 35 \mu\text{H}$  y el valor que se desea obtener es  $C_{out}$ .

<sup>10</sup> Ver Document 29114, NTCALUG03, Mini lug series. Vishay, april 2011.

<sup>11</sup> Ver datasheet GP1250 CSB Battery para observar los valores de temperatura apropiados a los cuales se debe cargar la batería VRLA.

<sup>12</sup> Tomado de Datasheet BQ24650 Texas instruments, página 21.

<sup>13</sup> Ver Datasheet BQ24650 Texas instruments, página 14.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L*C}} \quad (19)$$

El fabricante recomienda seleccionar un condensador cerámico X7R o X5R de 35 V o mayor para garantizar la estabilidad del lazo de control. Los condensadores X7R y X5R se caracterizan por tener un constante dieléctrica entre 2000-4000, esto permite a este tipo de condensadores tener valores de capacitancia más alta que los condensadores de tipo NPO (los cuales tienen una constante dieléctrica entre 15-100). Además, otra ventaja de los condensadores X7R y X5R es que su capacitancia es menos susceptible a cambios por cambios de temperatura<sup>14</sup>. El valor del condensador es calculado usando las ecuaciones 19 y 20.

$$\Delta V_o = \frac{V_{out}}{8*L*C_{out}*f_s^2} * \left(1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \quad (10)$$

$$C_{out} \approx 3.3 \mu F$$

En la figura 15 se observa el esquemático del cargador de batería. Para el diseño del cargador se tuvo en cuenta las recomendaciones hechas por el fabricante Texas Instruments para la elección de los componentes.

---

<sup>14</sup> Ver Document 29114, NTCALUG03, Mini lug series. Vishay, april 2011.

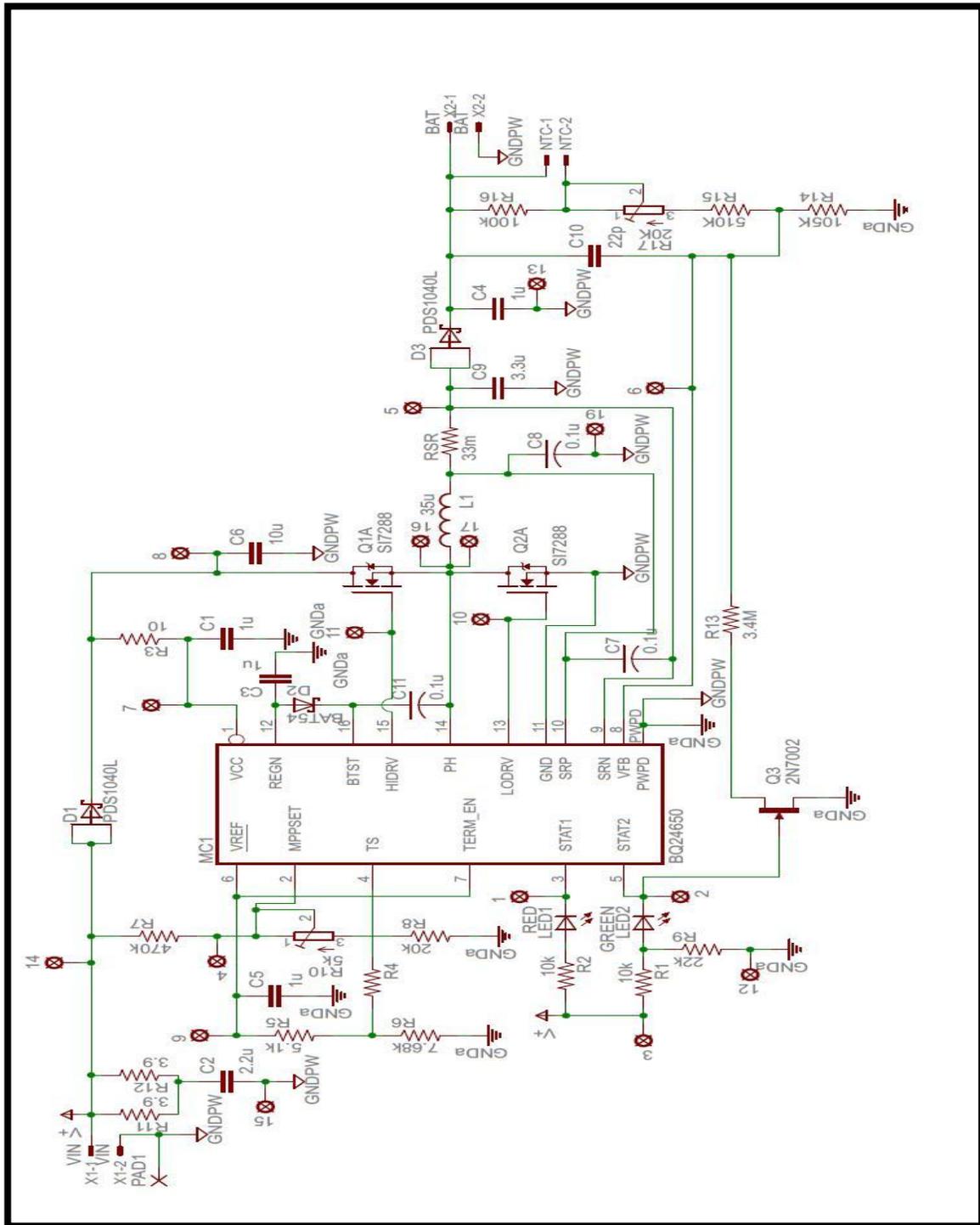


Figura 11. Esquemático del circuito cargador de batería<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Tomado de Application Report SLVA 437. Texas Instruments Septiembre de 2010.

#### 4.4 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario (Ver figura 16) es el dispositivo el cual permite realizar los cambios de posición para los ángulos de azimut e inclinación de la estructura móvil. La interfaz está programada para variar el ángulo de azimut en un rango de  $122^\circ$  y el ángulo de inclinación en un rango de  $44^\circ$ . El ángulo de inclinación se selecciono porque por regla general los módulos solares deben ser ubicados en un rango de  $\pm 15^\circ$  según la latitud del lugar de instalación. Este circuito es alimentado por una batería de 9 V, la cual es regulada a un valor de 5 V para suministrar energía al microcontrolador, y LCD. Adicionalmente posee un regulador que alimenta la tarjeta Xbee. La cual sirve para la comunicación inalámbrica con el circuito localizado en la estructura.



Figura 12. Interfaz de Usuario

#### Descripción del Teclado

P.A: Retorna la estructura a la posición inicial en el ángulo azimut.

P.I: Retorna la estructura a la posición inicial en el ángulo inclinación.

Clr: Permite borrar datos ingresados no deseados.

Az.: Selección del ángulo azimut.

In.: Selección del ángulo inclinación.

Los puertos configurados en el PIC para esta aplicación se muestran en la tabla 3.

COMPONENTE	SEÑAL DE ENTRADA O SALIDA	TIPO DE DATO	PIN SELECCIONADO
LCD	SALIDA	DIGITAL	RB7
LCD	SALIDA	DIGITAL	RB6
LCD	SALIDA	DIGITAL	RB5
LCD	SALIDA	DIGITAL	RB4
LCD	SALIDA	DIGITAL	RA0
LCD	SALIDA	DIGITAL	RA1
LCD	SALIDA	DIGITAL	RA2
TECLADO	ENTRADA	DIGITAL	RB0
TECLADO	ENTRADA	DIGITAL	RB1
TECLADO	ENTRADA	DIGITAL	RB2
TECLADO	ENTRADA	DIGITAL	RB3
TECLADO	SALIDA	DIGITAL	RB7
TECLADO	SALIDA	DIGITAL	RB6
TECLADO	SALIDA	DIGITAL	RB5
TECLADO	SALIDA	DIGITAL	RB4
LED DE ENCENDIDO	SALIDA	DIGITAL	RC0
XBEE	SALIDA	ANALOGA	RC7
XBEE	ENTRADA	ANALOGA	RC6

**Tabla 3. Conexiones del microcontrolador interfaz de usuario.**

#### **4.4.1 Programación Interfaz de usuario**

El sistema prosigue muestra las posiciones iniciales para los ángulos acimut e inclinación. Luego, se envía al usuario un mensaje solicitando el ángulo en el cual se desea efectuar modificaciones (cada dato ingresado debe ser confirmado pulsando la tecla **INTRO**). Una vez se reciba un dato valido, el sistema muestra un mensaje solicitando el valor al cual debe moverse, el. Si el número se encuentra dentro del rango establecido, aparece un mensaje en pantalla de espera hasta que el movimiento en la estructura sea efectuado. Luego aparecerá un registro con la nueva posición.

Para el ángulo azimut el está permitido ingresar un numero en el siguiente rango determinado  $30 \leq \text{Dato Ingresado} \leq 150^\circ$ . Para el ángulo de inclinación el rango programado es:

$$68^\circ \leq \text{Dato Ingresado} \leq 112^\circ.$$

Si el valor ingresado está dentro del rango permitido, el sistema evalúa el número de pasos de corriente necesarios para ubicarse en la nueva posición. Para esto se realiza la operación en la ecuación (20).

$$\text{Desplazamiento} = \text{Posición Deseada} - \text{Posición Actual} \quad (20)$$

En la figura 17 se observa el diagrama de flujo de la interfaz de usuario.

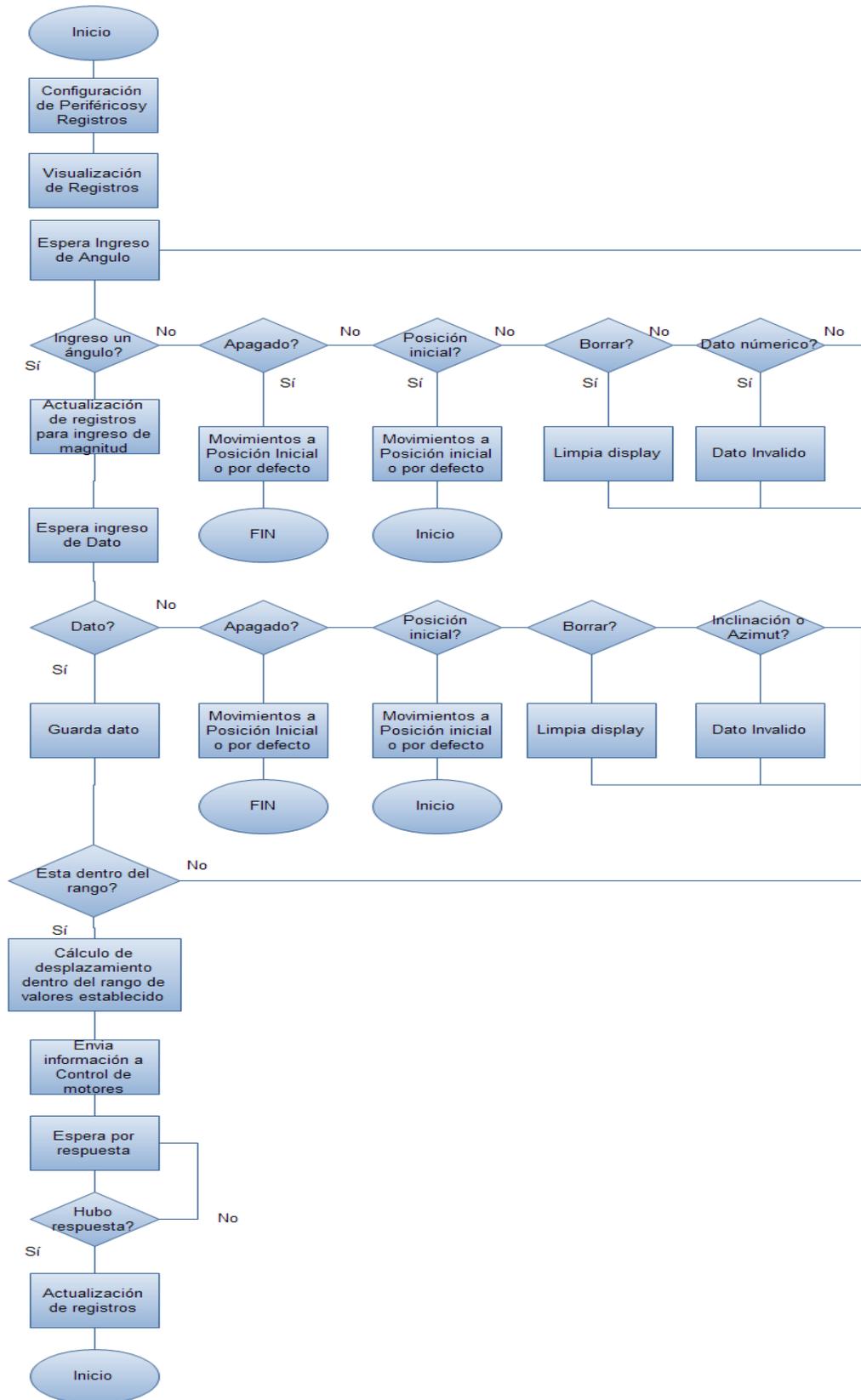


Figura 13. Diagrama de flujo Interfaz usuario.

Donde la posición deseada corresponde al dato ingresado por el usuario. La posición actual, corresponde a la posición inicial definida como  $30^\circ$  para acimut y  $68^\circ$  para inclinación ó la última posición seleccionada por el usuario en el respectivo ángulo. El sentido de giro se determina de acuerdo al resultado de la operación en (20). Es decir, que si el resultado de la resta es positivo la estructura se desplaza en el sentido de las manecillas del reloj, de lo contrario se desplaza en el sentido en contra de las manecillas del reloj.

Una vez conocidos los tres datos importantes; desplazamiento, sentido de giro y ángulo a desplazar se procede a transmitir éstos al control de motores de forma inalámbrica, cada uno de los registros se transmite uno por uno y con una ventana de tiempo el cual permita cargar los registros de transmisión.

Una vez transmitida la información de estos tres registros, la interfaz entra en un intervalo de espera, con el fin de confirmar si la comunicación ha sido exitosa o si se han presentado fallas para informarle al usuario. Si recibe una comunicación exitosa de movimiento, actualiza los registros de posiciones e indica al usuario que el movimiento fue realizado, en caso de recibir falla, no actualiza registros y le indica al usuario si hubo una falla de comunicación.

#### **NOTA IMPORTANTE:**

**Cuando se desea dejar de trabajar con el sistema es necesario regresar los dos ángulos a sus posiciones iniciales. Esto se debe hacer ya que el sistema no fue diseñado con un control por retroalimentación. Si el sistema es des-energizado antes de devolver los ángulos a sus posiciones iniciales, se perderá el ángulo de referencia.**

#### **4.5 Control Motores.**

El circuito control motores es el encargado de recibir toda la información suministrada por el usuario desde la interfaz. Y generar una señal de pulsos que permite desplazar el número de grados deseados en uno u otro ángulo. Los principales dispositivos en este circuito son el microcontrolador PIC16F87, la tarjeta de comunicación Xbee, el control de corriente de los drivers L6506<sup>16</sup> y los drivers L6203. La figura 14 muestra el esquemático de este circuito. El fabricante de los drivers, recomienda adicionar algunos componentes pasivos para obtener un mejor funcionamiento de los drivers<sup>17</sup>.

---

<sup>16</sup> Ver datasheet L6506 Current control for stepping motors, ST microelectronics, 1997

<sup>17</sup> Ver datasheet L6201, L6202, L6203 DMOS Full bridge driver. ST microelectronics, 1997

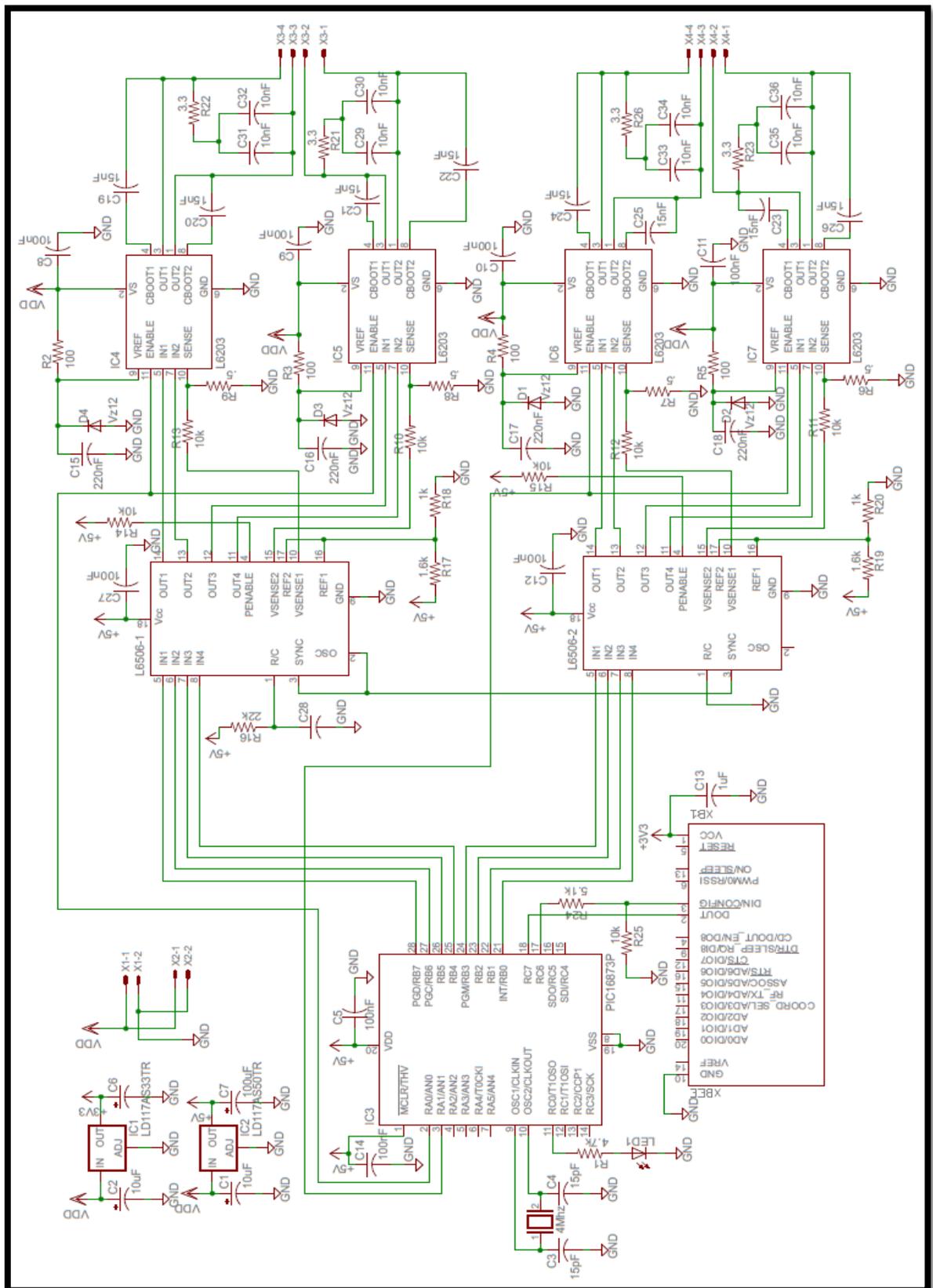


Figura 14. Esquemático del controlador de los motores híbridos de paso.

El IC **L6506** está diseñado para ser utilizado con controladores Puente H. la función principal del dispositivo es sensar y controlar la corriente en cada uno de las bobinas del motor de pasos. El fabricante recomienda polarizar el IC con un voltaje de 5 V. Adicionalmente se debe agregar un RC para fijar el frecuencia de operación de la lógica interna mediante el PIN 1. El RC se calcula como se muestra en la ecuación (21).

$$f = \frac{1}{0,69 * R_{16} C_{28}} \text{ para } R > 10 \text{ k}\Omega \text{ (21)}$$

Se supone una frecuencia de 20 Hz la cual es recomendada por el fabricante ST microelectronics para garantizar una respuesta más efectiva por parte del controlador de corriente. A su vez, se supone una  $R_{18} = 22 \text{ k}\Omega$  que es mayor a la recomendada por el fabricante para mejorar la respuesta en frecuencia del oscilador interno del dispositivo, el valor de  $c_{28} \rightarrow 3,3 \mu\text{F}$ , siendo el valor de condensador comercial más cercano para la frecuencia deseada.

Si en un mismo circuito son utilizados más de un L6506 es recomendado usar la conexión para que exista sincronización entre los IC. La figura 18 muestra la interconexión entre los dos dispositivos para que se cumpla esta regla.

Adicionalmente el valor para sensar la corriente debe ser fijado en los pines 16 y 17. Este valor debe estar entre  $\frac{2}{3}V_{cc}$  y  $\frac{1}{3}V_{cc}$ . Para este caso se seleccionó un voltaje de 1.9 V. Este voltaje es obtenido por medio de un divisor resistivo entre fuente y tierra con su punto medio en los dos pines mencionados. Las ecuaciones (22) y (23) son utilizadas para definir ese valor.

$$V_{ref} = \frac{V_{in}(R_{18})}{R_{17}+R_{18}} \text{ (22)}$$

$$I_{peak} = \frac{V_{ref}}{R_{sense}} \text{ (23)}$$

Donde  $V_{in} = 5 \text{ V}$ , se supone un valor de  $R_{18} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{sense} = 0.5 \Omega$  y  $I_{peak} = 3.8 \text{ A}$ . Con estos valores se obtiene el valor de  $R_{17} = 1,6 \text{ k}\Omega$ .

Para el uso de IC **L6203 DMOS FULL BRIDGE**, es un puente H compatible con señales de control TTL, CMOS y de microcontroladores. Además, elimina la necesidad de usar MOS externos. Bajo ciertas condiciones, es necesario seguir algunas sugerencias hechas por el fabricante ST microelectronics para mejorar el desempeño del dispositivo.

Este dispositivo está diseñado con DMOS internos que poseen un diodo entre DRAIN y SOURCE. Estos diodos pueden generar picos de corriente en el terminal de sensado. Debido a la carga y descarga de los condensadores asociados a estos DMOS<sup>18</sup>. Para solucionar este efecto el fabricante sugiere utilizar condensadores de Bootstrap entre el PIN BOOT1 o BOOT2 y su respectiva salida de un valor cercano a **10 nF**.

---

<sup>18</sup> Ver Datasheet L6203, ST microelectronics, DMOS FULL BRIDGE DRIVER.

Otra recomendación realizada por el fabricante es utilizar la configuración mostrada en la figura 15. Para que el Driver trabaje de manera adecuada se debe garantizar un voltaje de 12 V en  $V_s$ . Por lo tanto si se tienen fuentes que se encuentran entre 9 V y 18 V es recomendado agregar un diodo zener de 12 V entre el PIN  $V_{ref}$  y tierra en paralelo con un condensador. Adicionalmente una resistencia entre el punto  $V_{ref}$  y  $V_s$ .

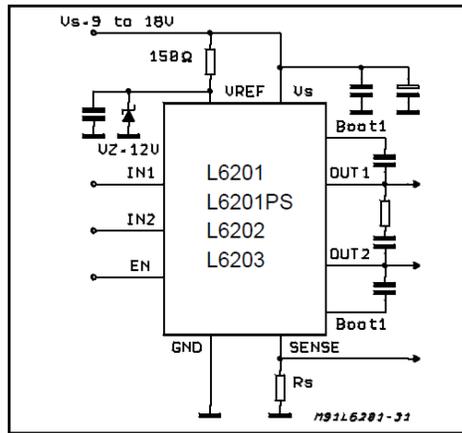


Figura 15. Configuración para voltajes  $V_s$  entre 9-18V<sup>19</sup>.

En la figura 15. También se observa un RC entre las salidas del IC L6203. “Esta serie de R y C corresponde a una red snubber sugerida por el fabricante ST microelectronics, la cual debe ser ubicada cerca a los pines de salida del componente”<sup>20</sup>. Las formulas a continuación se usan para calcular el valor de R y C apropiados. Este snubber tiene como función proteger los puente H de cualquier sobre pico de corriente que pueda provenir de la energía almacenada en los embobinados del motor.

$$R \approx V_s / I_p \quad (24)$$

$$C = \frac{I_p}{\left(\frac{dv}{dt}\right)} \quad (25)$$

Donde  $V_s$  es el voltaje máximo de entrada (el valor máximo al cual puede ser cargada la batería  $V_s = V_{bat-max} = 13.8 V$ ).  $I_p = 3.8 A$  Es la corriente máxima a la cual se desea que trabaje el sistema, se selecciona el valor de 3.8 A para permitir que los motores reciban la corriente suficiente para cada movimiento y con el fin de proteger los drivers de salida. De las ecuaciones 24 y 25 se obtienen  $R_{22} = 3.3 \Omega$  y  $C = 20 nF$ . En total el circuito que controla los motores posee cuatro red snubber para cada una de las salidas como se muestra en la figura 18.

#### 4.5.1 Programación Control de Motores

El programa inicia sus variables y prepara los registros de comunicación para recibir la información que le enviarán los registros, pasos, ángulo y orientación. Una vez que han recibido la información verifican que los valores de los datos son correctos, de no serlos envían un mensaje indicado error en la

<sup>19</sup> Figura tomada del datasheet L6203. ST microelectronics, pagina 14.

<sup>20</sup> Tomado de datasheet L6203. ST microelectronics. Página 12.

comunicación. Si los datos son correctos revisa cuál motor será el que se operará esto se hace leyendo la información del registro ángulo, si se recibe un 01 en binario se desplaza inclinación. Por el contrario, si recibe un 10 en binario se desplaza el acimutal, en caso de ser otro valor reporta error. Luego, recibe el registro llamado COLOR el cual indica el sentido de giro, este registro tiene definido 01 para sentido horario y 10 en sentido anti horario, cualquier otro valor es tomado como error. Una vez se el microcontrolador recibe estos dos registros habilita las salidas para habilitar el control de corriente L6506 y los drivers L6203 correspondientes. El dispositivo L6506 recibe las señales encargadas de controlar la velocidad del motor mediante el puente H (L6203). Dichas señales tienen una frecuencia de 30Hz por las razones descritas anteriormente<sup>21</sup>. Los motores de paso **85BYGH450C-012** requieren una secuencia de cuatro pasos (tabla 8). Esto determina la dirección de giro del eje del motor.

Paso	Terminales			
	Rojo	Verde	Azul	Amarillo
1	1	0	1	0
2	1	0	0	1
3	0	1	0	1
4	0	1	1	0

**Tabla 4. Secuencia de movimiento del motor.**

El diagrama de flujo del control de motores se muestra en la figura 14.

---

<sup>21</sup> Velocidad angular del sistema mecánico de 9rpm.

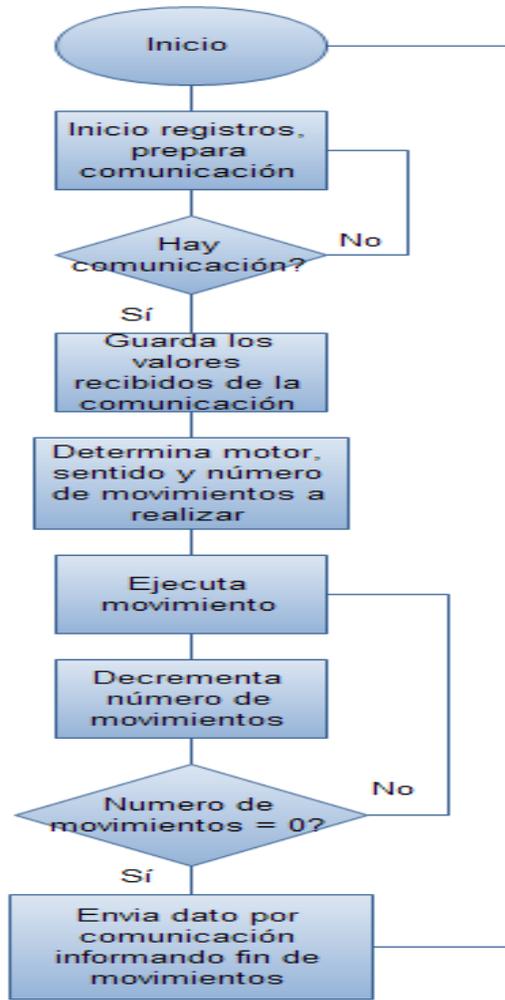


Figura 14. Diagrama de flujo programa motores.

Una vez se alcanza la posición deseada el sistema envía un mensaje a la interfaz de usuario indicando que el movimiento se realizó con éxito. En caso donde el movimiento no se realice como consecuencia de un error de recepción de datos, el control de motores envía un mensaje de error a la interfaz de usuario. En este caso se muestra en el LCD un mensaje “ERROR”.

#### 4.6 Transmisión y recepción de datos

Los datos que permiten la interacción del usuario con el panel solar son los referentes a los valores de control de los componentes, tales como ángulo, desplazamiento y sentido de giro. La transmisión-recepción de estos datos se realizó inalámbricamente utilizando las tarjetas XBee que transmiten la información de manera digital, y de forma serial. La configuración del microcontrolador se hizo mediante la USART, con una tasa de transferencia de 9600 kbps y tasa de error del 0.17%. El objetivo de minimizar la tasa de error en el envío de datos es evitar pérdidas o corrupción de datos.

Se establece una comunicación punto a punto entre los módulos XBee. Para establecer este tipo de comunicación se configuran parámetros tales como la dirección de identificación, el canal y el PAN ID. Esta configuración se realizó utilizando el programa X-CTU.<sup>22</sup>

Los valores que se utilizaron para la configuración de las XBee se resumen en la tabla 5.

DEFINICIÓN DE PARAMETROSDELA XBEE		
Parámetros	Xbee Intefaz Usuario	Xbee Control de Motores
CHANNEL		B
PAN ID		3333
MY ADDRESS	13200 405394A3	13200 303AA747
DT DESTINATION ADDRESS	13200 303AA747	13200 405394A3

**Tabla 5. Parámetros utilizados durante la configuración**

---

<sup>22</sup> El programa se encuentra gratis y se puede descargar desde la página [www.digi.com](http://www.digi.com)

## 5. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 5.1 Movimiento y posicionamiento

Se realizaron pruebas de la estructura, interfaz de usuario, circuito cargador y control de motores. Estas pruebas se basan en diferentes movimientos efectuados desde la interfaz de usuario para los dos grados de libertad con y sin el módulo fotovoltaico en su lugar. Las pruebas realizadas al cargador de baterías se realizaron simulando el voltaje de entrada con una fuente de alimentación.

#### Movimiento de Inclinación

El rango para el ángulo de inclinación es  $[68^{\circ}-112^{\circ}]$  con respecto a la vertical ó  $\pm 22^{\circ}$  respecto a la horizontal como se muestra en la figura 15. Este rango de movimiento se encuentra dentro del rango estándar para establecer la inclinación de un sistema fotovoltaico, el cual corresponde a la latitud  $\pm 15^{\circ}$ .

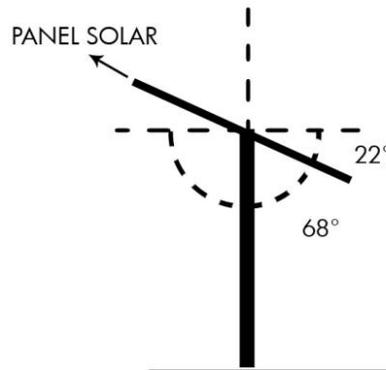


Figura 15. Posición inicial para movimiento de inclinación.

Para las pruebas de funcionamiento del ángulo de inclinación se realizaron desplazamientos con diferentes magnitudes tales como  $1^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$ ,  $10^{\circ}$  y el rango completo. El instrumento de medición utilizado fue **inclinómetro análogo**. Este instrumento desvía una aguja dependiendo el ángulo de la superficie donde el instrumento es localizado. Por ejemplo, si la superficie del módulo fotovoltaico se encuentra en paralelo con la superficie del piso, el ángulo que se puede observar en el instrumento es  $0^{\circ}$ . En la tabla 6 se muestra posición inicial, magnitud de giro, sentido de giro y posición final para movimientos horarios con magnitud de desplazamiento de  $1^{\circ}$ .

Posición Inicial	Magnitud de Desplazamiento	Sentido de giro	Posición Final
68º	1º	Horario	69º
69º	1º	Horario	70º
70º	1º	Horario	71º
71º	1º	Horario	72º
72º	1º	Horario	73º
73º	1º	Horario	74º
74º	1º	Horario	75º
75º	1º	Horario	76º
76º	1º	Horario	77º
77º	1º	Horario	78º
78º	1º	Horario	79º
79º	1º	Horario	80º

**Tabla 6. Secuencia de movimiento de inclinación, sentido horario con desplazamientos de 1º.**

Se encontró que para los movimientos en sentido horario con desplazamientos de 1º, el sistema se comportó conforme a lo esperado sin presentar errores de posición. Se realizó la misma prueba en sentido anti horario, los resultados pueden observarse en la tabla 7.

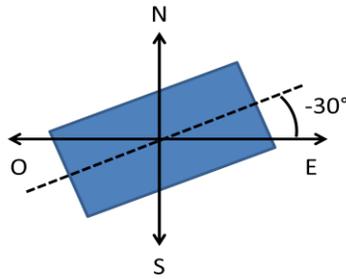
Posición Inicial	Magnitud de Desplazamiento	Sentido de Giro	Posicion Final
80º	1º	Anti Horario	79º
79º	1º	Anti Horario	78º
78º	1º	Anti Horario	77º
77º	1º	Anti Horario	76º
76º	1º	Anti Horario	75º
75º	1º	Anti Horario	74º
74º	1º	Anti Horario	73º
73º	1º	Anti Horario	72º
72º	1º	Anti Horario	71º
71º	1º	Anti Horario	70º
70º	1º	Anti Horario	69º
69º	1º	Anti Horario	68º

**Tabla 7. Secuencia de movimiento de inclinación, sentido anti horario con desplazamientos de 1º.**

El retroceso de la estructura fue preciso y sin inconvenientes. En el anexo 8.5, pueden observarse las tablas de otras pruebas realizadas para desplazamientos en ambos sentidos con magnitudes de 5º, 10º, 20º y 40º.

### **Movimiento Acimutal**

La posición inicial de la estructura para el ángulo azimut es como se muestra en la figura 16. A partir de este punto se puede realizar un movimiento hasta de 120º en sentido horario, el cual corresponde el rango completo programado para dicho ángulo.



**Figura 16. Posición inicial movimiento acimutal.**

Para las pruebas de funcionamiento de este movimiento, se realizaron desplazamientos con diferentes magnitudes. El instrumento usado para realizar las mediciones fue un transportador fijado al movimiento acimutal, en la tabla 8 se relaciona la posición inicial, la magnitud de desplazamiento, sentido de giro y posición final para movimientos horarios y anti horarios con desplazamientos de 5° de magnitud.

Posicion Inicial	Magnitud de Desplzamiento	Sentido de Giro	Posicion Final
30°	5°	Horario	35°
35°	5°	Horario	40°
40°	5°	Horario	45°
45°	5°	Horario	50°
50°	5°	Horario	55°
55°	5°	Horario	60°
60°	5°	Horario	65°
65°	5°	Horario	70°
70°	5°	Horario	75°
75°	5°	Horario	80°
80°	5°	Anti Horario	75°
75°	5°	Anti Horario	70°
70°	5°	Anti Horario	65°
65°	5°	Anti Horario	60°
60°	5°	Anti Horario	55°
55°	5°	Anti Horario	50°
50°	5°	Anti Horario	45°
45°	5°	Anti Horario	40°
40°	5°	Anti Horario	35°
35°	5°	Anti Horario	30°

**Tabla 8. Secuencia de movimiento acimutal, en ambos sentidos con desplazamientos de 5°.**

Se comprobó que los desplazamientos para el ángulo acimut responden correctamente a los requerimientos del usuario. Este ángulo no sufre fuerzas adicionales que generen una pérdida con la referencia del sistema ó punto inicial. En el anexo, se pueden observar las tablas de otras pruebas realizadas para desplazamientos en ambos sentidos de magnitudes de 1°, 10°, 20° y 40° y también de modo aleatorio.

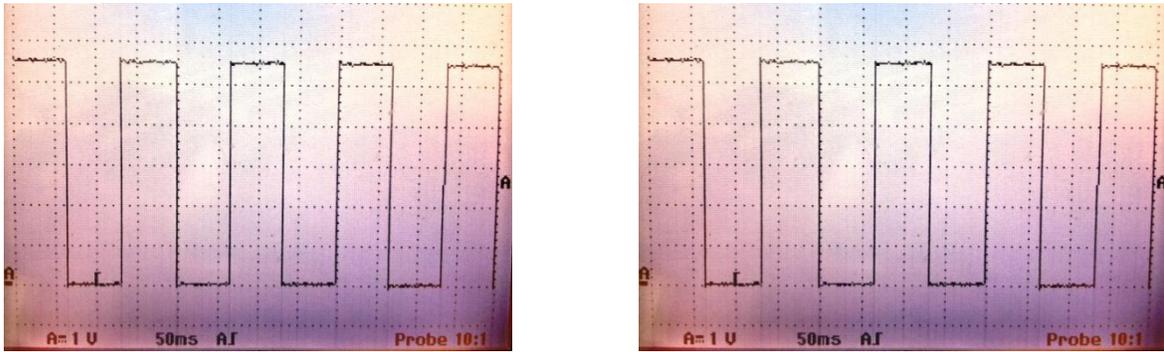


Figura 17. Graficas del tren de pulsos generados por el microcontrolador en el circuito controlador motores. V/div: 1v  
T/div: 50ms

## 5.2 Comunicación

Para comprobar la comunicación se utilizó un analizador de paquetes para la captura de las comunicaciones inalámbricas, para la visualización de las capturas se usó el programa Texas Instruments Packet Sniffer<sup>23</sup>. Exclusivamente para analizar el canal B con el cual fueron configurados los módulos RF Xbee.

Se realizaron pruebas, para los dos distintos escenarios posibles que se pueden presentar. Se obtuvo una comunicación exitosa cuando se transmite y cuando se recibe información por parte de las dos tarjetas. La comunicación entre estos dos módulos no presenta ningún tipo de pérdida o distorsión de la información.

En la figura 18 se puede visualizar una captura del analizador de paquetes, en donde la interfaz de usuario envía los 3 registros; número de grados a desplazar, ángulo y orientación recibiendo como respuesta un *acknowledge* por parte de la tarjeta lógica de motores. Finalmente, cuando los movimientos se han realizado la tarjeta lógica de motores transmite el mensaje que indica que el movimiento fue exitoso.

Dentro de la aplicación también se encuentra un estado, en el cual el circuito “control motores” debe indicar en caso de un error en la transferencia de datos. Este problema no se presentó durante las pruebas, así que mediante el uso del software de programación de la Xbee se usó el comando terminal con el cual se transmitieron los bits que indicarían fallos en la aplicación, para verificar si la interfaz de usuario cumplía con el proceso adecuado en caso de haber un error. En la figura 19 se observa que en la segunda trama de la interfaz de usuario, hay un dato hexadecimal enviado como 06, el cual no está dentro de los valores permitidos por la variable ángulo, al llegar al control de motores, este analiza la información y retorna un dato hexadecimal 08, el cual se presenta en caso de haber corrupción de dato, quedando mostrado que en caso de haber un error en la comunicación el sistema informará al usuario de manera oportuna.

<sup>23</sup> Se puede descargar en el siguiente link totalmente gratis <http://www.ti.com/lit/sw/swrc045u/swrc045u.zip>.

Texas Instruments SmartRF Packet Sniffer IEEE 802.15.4 MAC and ZigBee 2003													
File Settings Help													
ZigBee 2003													
P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	LQI	FCS
RX			Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr						
1	+0	20	DATA	0	0	1	1	0xFC	0x3333	0x0013A2004081295C	0x0000 01 00 05	172	OK
2	+1027	5	ACK	0	0	0	0	0xFC				188	OK
3	+4049132	20	DATA	0	0	1	1	0xFD	0x3333	0x0013A2004081295C	0x0000 02 00 01	176	OK
4	+1023	5	ACK	0	0	0	0	0xFD				188	OK
5	+4049025	20	DATA	0	0	1	1	0xFE	0x3333	0x0013A2004081295C	0x0000 03 00 02	184	OK
6	+1018	5	ACK	0	0	0	0	0xFE				172	OK
7	+14025591	20	DATA	0	0	1	1	0x2B	0x3333	0x0013A200403A6C2C	0x0000 02 00 01	132	OK
8	+1027	5	ACK	0	0	0	0	0x2B				192	OK

Figura 18. Tramas captadas por el sniffer.

P.nbr.	Time (us)	Length	Frame control field				Sequence number	Dest. PAN	Dest. Address	Source Address	MAC payload	LQI	FCS
RX			Type	Sec	Pnd	Ack.req	PAN_compr						
1	+0	20	DATA	0	0	1	1	0x8E	0x3333	0x0013A2004081295C	0x0000 0F 00 08	232	OK
2	+1024	5	ACK	0	0	0	0	0x8E				184	OK
3	+4975142	20	DATA	0	0	1	1	0x8F	0x3333	0x0013A2004081295C	0x0000 10 00 06	232	OK
4	+1021	5	ACK	0	0	0	0	0x8F				188	OK
5	+16383032	20	DATA	0	0	1	1	0x90	0x3333	0x0013A2004081295C	0x0000 11 00 02	224	OK
6	+1017	5	ACK	0	0	0	0	0x90				192	OK
7	+2008404	20	DATA	0	0	1	1	0x20	0x3333	0x0013A200403A6C2C	0x0000 01 00 08	196	OK
8	+1023	5	ACK	0	0	0	0	0x20				240	OK

Figura 19. Respuesta con problemas en comunicación.

### 5.3 Cargador de Batería

El comportamiento del circuito cargador de la batería fue puesto a prueba bajo condiciones ideales, donde se supone que el voltaje entregado por el panel solar es constante. Para simular este comportamiento se usó una fuente de voltaje conmutada de 30 V y 2 A.

La fuente es conectada a los terminales de entrada del circuito cargador con su correspondiente polaridad, de igual manera se conecta la batería a los terminales de salida del circuito cargador. Se debe verificar que la conexión tenga la polaridad correcta para evitar daños irreversibles a los componentes, la fuente de voltaje o la batería.

### 5.3.1 Problemas del circuito cargador

El circuito cargador diseñada en base al IC BQ24650, presentó problemas cuando el dispositivo entrada en modo de apagado (la fuente de entrada por debajo de los 175 mV que requiere el punto  $V_{CC}$  para mantener el dispositivo encendido y volver a iniciar el ciclo de carga). Este problema se observa claramente cuando la batería se encontraba conectada al circuito y el voltaje a la entrada era menor al requerido para encender el IC. En este caso, el voltaje de la batería se ve reflejado en los pines PH y BTST del dispositivo BQ24650, lo que a su vez afectaba el control de los dos MOSFET de conmutación en la topología "BUCK".

En la figura 20 se observa que por medio del diodo D3. El voltaje de la batería puede ser bloqueado en los pines mencionados anteriormente. El diodo es localizado entre el LC y el lazo de realimentación del sistema. Se utilizó un diodo de bajo  $V_F$  como el que se utiliza para separar el circuito del panel solar, en este caso la referencia del componente es PDS1040L.

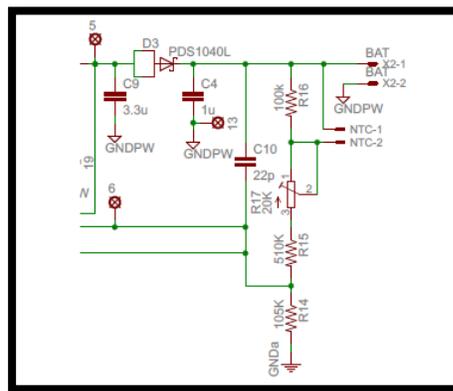


Figura 20. Sugerencia para solucionar el problema de arranque del circuito.

### 5.3.2 Funcionamiento del circuito

Como se había planteado en el capítulo anterior el dispositivo BQ24650 trabaja en tres etapas de carga tales como precarga, carga con corriente constante, carga con voltaje constante. En la primera parte la batería se carga con una corriente aproximada corriente diez veces menor a la corriente máxima de carga cuando el voltaje  $V_{FB}$  se encuentra por debajo de 1,5 V. Durante la etapa de carga con corriente constante, la batería se carga a la corriente máxima que pueda entregar el modulo solar para que el voltaje en la entrada sea igual al valor programado. En la tercera etapa el voltaje se mantiene constante mientras que la corriente de carga disminuye hasta 0 A. En la figura 21 se observa la gráfica del voltaje sobre los terminales de la batería y en el punto de referencia  $V_{ref}$ . Durante esta prueba la corriente máxima que entregó la fuente de alimentación (GW-instek GPC 3030D) fue 350 mA.

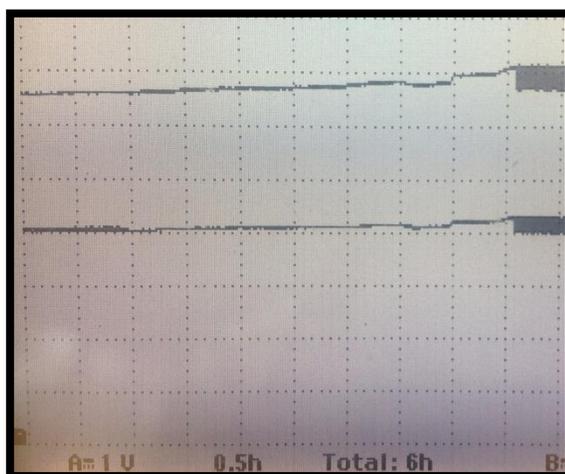


Figura 21. Gráfica del voltaje de carga sobre la batería Canal A V/Div:1V;Tiempo Total:6Horas, Canal B: V/Div: 500mV

La figura 22 muestra la frecuencia de conmutación o señales de control que reciben los transistores Q1A y Q2A del circuito cargado (ver figura 22). En estas graficas se observa un ciclo útil  $D \approx 0.5$  y una frecuencia de conmutación  $f_s \approx 600 \text{ kHz}$ . Estas señales de voltaje sobre los GATES de los transistores son las esperadas para una fuente BUCK que al alcanzar el voltaje máximo deseado, el voltaje sobre la batería empieza a ser constante evitando que la batería se sobrecargue, lo que indica un comportamiento deseable para las funciones del dispositivo.

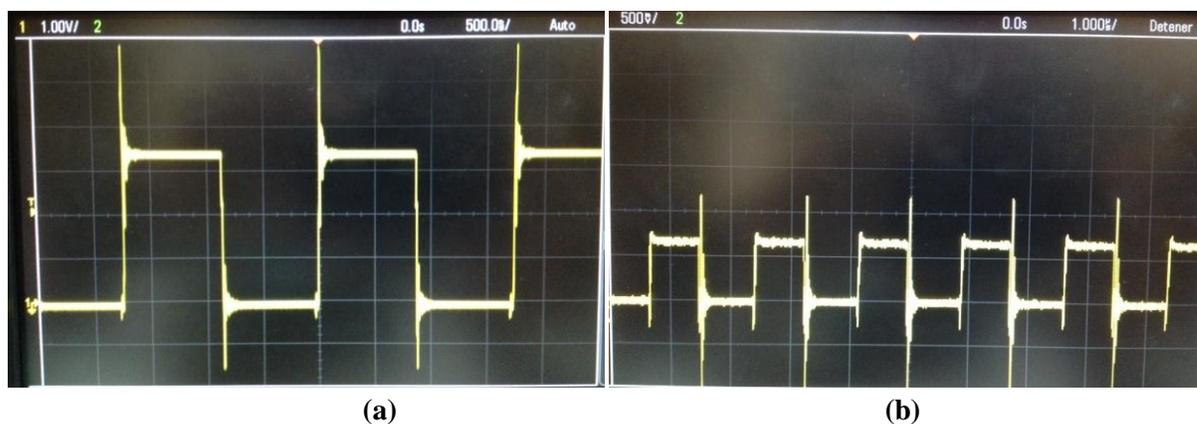


Figura 22. Señales de control que reciben los GATES de los Transistores Q1A y Q2A. a) V/div: 1V T/div: 500ns; b) V/div: 5V T/div T/div: 1µs.

### 5.3.3 Etapa de Precarga

El fabricante Texas Instruments recomienda para baterías de ácido de plomo el circuito mostrado en la figura 23, para deshabilitar la etapa de precarga en el circuito<sup>24</sup>. La opción de

<sup>24</sup> Ver application note SLVA437. Texas Instruments. Septiembre 2010

precarga está diseñada especialmente para baterías Li-on como medida de seguridad. Recordemos que la corriente de precarga es aproximadamente 1/10 de la corriente máxima de carga. Para el caso de baterías de ácido de plomo viejas las cuales son descargadas en exceso, es muy difícil poder llegar al voltaje apropiado de  $V_{FB} \geq 1.5 V$  durante los 30 minutos en los cuales este método está programado. Por lo tanto, se sugiere en futuros proyectos implementar este circuito para evitar que el dispositivo BQ24650 no permita cargar una batería que ha caído por debajo del  $V_{lowb}$  programado.

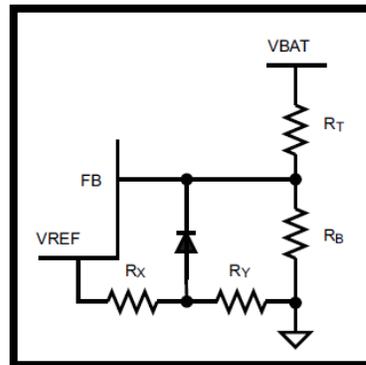


Figura 23. Circuito para deshabilitar la etapa de precarga.<sup>25</sup>

<sup>25</sup> Imagen tomada de application note SLVA437. Texas Instruments, 2010. Página 7

## 6. CONCLUSIONES

- Durante el desarrollo de este trabajo de grado se analizaron diferentes aspectos que dificultan el movimiento y posición de un módulo fotovoltaico con el fin de conseguir un sistema electromecánico adecuado. En el proceso se encontró que es necesario tener en cuenta factores externos que pueden afectar el sistema como el viento. Dependiendo de la dirección y velocidad del viento, el montaje puede ser afectado por estas fuerzas, en especial para el ángulo de inclinación. Para vientos mayores al promedio utilizado, el mecanismo puede desplazarse de su posición establecida. Al ser un sistema no retroalimentado estos desplazamientos no quedan registrados y el sistema pierde precisión.
- La estructura es capaz de moverse la cantidad de ángulos necesarios para realizar mediciones de energía producida por el panel solar en trabajos futuros.
- El sistema respondió favorablemente a las diferentes pruebas de posicionamiento realizadas. Bajo condiciones de trabajo con vientos de poca velocidad el sistema electromecánico fue capaz de soportar el panel en su posición para los ángulos de inclinación y azimut.
- La relación electromecánica para el control de lazo abierto del sistema es de vital importancia, por eso es necesario un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos. Por este motivo el motor a pasos permite realizar la mejor aproximación para esta aplicación. Conociendo el desplazamiento por cada paso se puede definir la relación para el conjunto de engranajes.
- La carga de la batería por medio del dispositivo BQ24650 requiere algunas modificaciones al esquema básico planteado por Texas Instruments, para el uso de baterías de ácido de plomo. Por otra parte, la corriente de carga depende estrictamente de la curva de potencia de la fuente de entrada. A pesar, de fijar el valor máximo de corriente  $R_{SR}$  para la carga, esto no representa que la batería va a ser cargada con ese valor de corriente en toda ocasión.

### 6.1 Recomendaciones

- Debido a que el ángulo de inclinación es el que experimenta más fuerza. Se recomienda buscar un sistema electromecánico más eficiente el cual permita ejercer un freno mecánico al sistema por sí solo. Se observó que en ocasiones la fuerza ejercida por el viento sobre la instalación solar puede hacer que haya desplazamiento en el ángulo de inclinación. Lo cual genera una pérdida de precisión en el sistema.
- Se recomienda incluir sensores como medida de seguridad para evitar que en el caso en el que se pierda la referencia de la posición inicial el sistema no efectúe movimientos que puedan afectar el cableado o provocar algún golpe sobre la parte posterior del módulo fotovoltaico.

- Para los trabajos futuros se sugiere realizar un control de lazo cerrado, de esta forma se puede tener en cuenta las perturbaciones que afectan al sistema y evitar pérdida de precisión. A su vez, implementar una memoria ROM a la interfaz de usuario para mantener los registros de la última posición en la que se usó la estructura y eliminar la necesidad de retornar la estructura a la posición inicial cada vez que vaya a apagar la interfaz de usuario.
- Se recomienda mantenimiento preventivo de los elementos electromecánicos del sistema para evitar oxidación en ella.

## 7. REFERENCIAS

- [1]. B2B. Colombia una potencia en energías alternativas [en línea] <[http://www.renewablesb2b.com/ahk\\_colombia/es/portal/index/news/show/09ac2c39eb20cbc9](http://www.renewablesb2b.com/ahk_colombia/es/portal/index/news/show/09ac2c39eb20cbc9)> [citado el 20 de enero de 2011].
- [2]. Universidad Politécnica de Valencia, título propio de especialista universitario en energía solar fotovoltaica, modulo 1. Año 2010.
- [3]. RODRIGUEZ, Humberto. “Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas”. Revista de Ingeniería No. 28, pp 83-89. 2009.
- [3]. Grisales, Victor Hugo. Apuntes de clase Controles. 2008. Pontificia Universidad Javeriana.
- [4]. William Stallings, Comunicaciones y Redes de computadores. Madrid. Editorial Prentice Hall 2006.
- [5]. MaxStream. XBee/XBee Pro OEM RF Modules. Lindon : s.n., 2007.
- [6]. Faludi, Robert. Wireless Sensor Networks. United States of America : O'Reilly, 2011. 978-0-596-80773-3.
- [7] Texas Instruments. Application note SLVA437. 2010.
- [8] ST Microelectronics. Datasheet L6201, L6502, L6203 “DMOS FULL BRIDGE DRIVER”. 1997
- [9] ST Microelectronics. Datasheet L6506 “Current control for stepping motors”, 1997.
- [10] Texas Instruments. “Synchronous Switch-mode Battetry Charger for Solar Power with Maximum Power Tracking. 2010.
- [11] FULLIBATTERY, “Valve Regulated Lead-Acid Rechargable Battery FL1250Gs”. 2010.
- [12] PANASONIC. “Charging Methods VRLA Batteries”. 2005.
- [13] [www. fullmecnica.com/f/fuerza-del-viento-presion-del-viento](http://www.fullmecnica.com/f/fuerza-del-viento-presion-del-viento) consultada 20 de junio de 2012.

## **8. ANEXOS**

- A. Hojas de especificaciones y artículos de componentes utilizados.
- B. Información sobre los módulos Xbee.
- C. Códigos de programa y librerías.
- D. Código Interfaz usuario.