

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Control de Paneles Solares Fotovoltaicos

Autor: Asmel Marrero Valdivia

Tutor: Dr. José Rafael Abreu García

Santa Clara

2017

"Año 59 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Control de Paneles Solares Fotovoltaicos

Autor: Asmel Marrero Valdivia

amvaldivia@uclv.cu amvaldivia93@nauta.cu

Tutor: Dr. José Rafael Abreu García

Dr. José Rafael Abreu García Profesor Titular Departamento de Automática y Sistemas Computacionales. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad Central de Las Villas

abreu@uclv.edu.cu

Santa Clara

2017

"Año 59 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“Una importante especie biológica está en riesgo de desaparecer por la rápida y progresiva liquidación de sus condiciones naturales de vida: el hombre.”

Fidel Castro Ruz

DEDICATORIA

A Dios,

Por darme la vida y fuerzas para seguir cada vez que lo necesité.

A mis padres,

Por haberme apoyado en cada paso que he dado en la vida.

A mi esposa,

Por estar a mi lado y ayudarme en estos años de universidad.

A José Rafael Abreu García,

Por ser, más que un profesor, una fuente de inspiración.

A todos mis profesores,

Por haberme formado como profesional, dando siempre lo mejor de sí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Nancy A. Valdivia Claro y Orlando J. Marrero Brito por haber estado a mi lado desde mi nacimiento hasta hoy, dando siempre lo mejor de sí para que yo pudiera alcanzar mis metas y cumpliera todos mis sueños y aspiraciones en la vida.

A mi esposa Dayamí Victorero Rojas por acompañarme en este fragmento del camino de la vida, siempre apoyándome y exhortándome a seguir adelante.

A mi tutor José Rafael Abreu García por ayudarme desde el primer día a investigar y desarrollar este trabajo, siempre con el interés y logrando dejar en mí ese amor por el conocimiento y la aplicación de éste.

A todos los profesores que durante los cinco años de universidad me formaron como profesional, pero también como ser humano. Impartiendo en cada momento no solo conocimiento sino como aplicar este a la vida (María del Carmen, Eduardo Izaguirre, etc.).

A mis amigos, que en muchos casos no solo fueron eso, sino que pasaron a ser familia (N. David, Guille, Ángel, René, Néstor Rodríguez, entre otros muchos). También a otros que no han estado a mi lado físicamente los últimos años pero igual me han apoyado incondicionalmente (Manuel A. Humberto A. y Oscar Victorero).

A Raúl Castro Hurtado que al igual que mi padre fue la fuente de inspiración que me llevó a elegir este camino.

A todos aquellos que me han ayudado a vencer este objetivo tan importante en mi vida.

Gracias.

RESUMEN

El trabajo presentado se encamina a lograr un mayor rendimiento de los paneles solares fotovoltaicos mediante su control, implementando en este, el de su posición. Con el objetivo de que estos estén siempre frente al sol, de manera que la incidencia de los rayos solares sea máxima.

Se parte de la selección de un sistema fotovoltaico que trabaje de manera aislada, sin respaldo del sistema eléctrico nacional, utilizándose como caso de estudio un sistema para proporcionar agua a un rebaño de reses y una casa aislada.

El control del punto de operación de los paneles se analizará siguiendo el algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking por sus siglas en inglés). Este no será implementado ya que en la actualidad vienen incluido en el módulo fotovoltaico.

En cuanto a la forma de controlar la posición se utiliza la determinación de la posición del sol mediante la solución de las ecuaciones que determinan su posición en dependencia de la latitud del lugar, el día del año y la hora. Esto se implementa en un Arduino.

Para el movimiento del panel se proponen motores por pasos, por las facilidades de su control y la disponibilidad de hardware.

El análisis económico realizado ha permitido comprobar que el incremento de la energía captada es superior a la utilizada por el sistema de seguimiento, aunque se haya incrementado la inversión inicial en un monto poco significativo.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. DESARROLLO Y CONTROL DE LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	5
1.1 Introducción	5
1.2 Desarrollo en la obtención de energía solar fotovoltaica	5
1.3 Evolución de los sistemas de control en instalaciones fotovoltaicos	6
1.4 Máxima eficiencia de los sistemas fotovoltaicos	7
1.5 Estrategias de control en seguidores solares	8
1.5.1 Estrategias de control según el tipo de movimiento.	8
1.5.2 Estrategias de control según el tipo de algoritmo de seguimiento.....	9
1.6 Revisión actual de los métodos de control de posición en seguidores solares.....	10
1.7 Casos de estudio	11
1.7.1 Energía solar para casas aisladas de la red eléctrica nacional	11

1.7.2	Bombeo solar para entidades agropecuarias	12
1.8	Consideraciones finales del capítulo	13
CAPÍTULO 2. ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA FOTVOLTAICO CON CONTROL DE POSICIÓN		14
2.1	Introducción	14
2.2	Selección de los elementos del sistema solar fotovoltaico.....	14
2.2.1	Identificación del recurso solar disponible en la zona.....	15
2.3	Estimación del Consumo.....	15
2.4	Dimensionamiento del Generador Fotovoltaico	17
2.5	Dimensionamiento del Sistema de acumulación. (Baterías).....	18
2.6	Selección del Regulador.....	19
2.7	Selección del Inversor	20
2.8	Análisis para el caso del bombeo solar	20
2.8.1	Identificación del recurso solar disponible en la zona.....	20
2.8.2	Identificación de la demanda energética para el bombeo de agua.....	21
2.9	Hardware de control	23
2.9.1	Plataforma de prototipos electrónica Arduino	23
2.10	Software de programación.....	24
2.11	Reloj de tiempo real.....	25
2.12	Estudio del movimiento solar para el control de la posición del panel	25
2.12.1	Ángulo de declinación δ	27
2.12.2	Posición solar en relación a la tierra	27
2.12.3	Ecuación del tiempo.....	28
2.12.4	Ángulo horario ω	28

2.12.5	Altura α y Azimut solar γ	29
2.13	Estructura de sujeción del módulo FV y sus mecanismos de seguimiento.	30
2.14	Estructura mecánica.....	31
2.15	Mecanismo de accionamiento	34
2.16	Motor paso a paso.....	35
2.16.1	Selección de motor.....	36
2.17	Consideraciones finales del capítulo	36
CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE CONTROL PARA EL MÓDULO SOLAR FOTVOLTAICO.....		37
3.1	Introducción	37
3.2	Algoritmos de control para el seguimiento del Punto de Máxima Potencia.....	38
3.2.1	Algoritmo de Perturbación y Observación (P&O)	38
3.2.2	Algoritmo de Conductancia Incremental (CondInc)	39
3.3.1	Modelado del panel.....	40
3.3.2	Modelado del convertidor.....	42
3.3.3	Convertidor Buck.....	43
3.3.4	Convertidor Boost.....	44
3.3.5	Convertidores reductores elevadores	44
3.4	Algoritmo aplicado para el control de la posición.	45
3.5	Validación del algoritmo y software de control aplicado	46
3.6	Análisis económico y medioambiental	49
3.7	Consideraciones finales del capítulo	51
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		52
	Conclusiones	52

Recomendaciones	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXOS	56
Anexo I Evolución de los sistemas de seguimiento solar	56
Anexo II Esquema de funcionamiento y lazo de control de seguidor solar por luminosidad 57	
Anexo III Características de la plataforma de desarrollo Arduino UNO	58
Anexo IV Interfaz de programación para la plataforma Arduino	58
Anexo V Reloj de tiempo real RTC DS 1307	59
Anexo VI Datos de chapa del motor paso modelo 85BYGH45C-12	59
Anexo VII Diagrama de flujo del algoritmo P&O	60
Anexo VIII Diagrama de flujo del algoritmo CondInc	61
Anexo IX Diagrama de simulación en Simulink de un panel fotovoltaico	62
Anexo X Diagrama de simulación en Simulink de una asociación de 2 paneles fotovoltaicos 62	
Anexo XI Diagrama de simulación en Simulink del convertidor Buck	63
Anexo XII Software de control implementado en el Arduino	63
Anexo XIII Maqueta a escala del mecanismo de accionamiento	79
Anexo XIV Datos experimentales obtenidos del controlador Arduino	80
Anexo XV Dinámica del mecanismo de seguimiento solar	80

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es vital para el desarrollo económico social en el mundo actual, las fuentes para su obtención son diversas pero hasta la fecha las más utilizadas son los combustibles fósiles, estos resultan inestables en sus precios así como muy dañinos al medioambiente y en vías de agotamiento, por estas razones en todo el mundo se ha manifestado la tendencia a la utilización de energías renovables, de acuerdo a las fuentes existentes y en el caso de nuestro país la que más posibilidades tiene es la energía solar.

La energía solar es una fuente de energía limpia, renovable, que no modifica el medio ambiente y sobre todo es gratuita. Según el 21° Estudio del World Energy Council, para el año 2100 el 70% de la energía consumida será de origen solar (Cardozo and Jara, 2014). En solo una hora el Sol suministra más energía a la Tierra que la que se consume en un año en todo el mundo. Sobre la base de esta tecnología fotovoltaica, la luz solar puede convertirse en electricidad directamente y ser utilizada en cualquier aplicación. (Figueredo, 2010)

Esto sucede en los paneles solares fotovoltaicos, de los cuales se obtiene electricidad con bajo costo y sin peligro de contaminación para la atmósfera. Esta electricidad se usa con mucho éxito en Cuba en las zonas rurales.

Cuba es un país con una posición privilegiada en cuanto a la cantidad de radiación solar incidente en toda su extensión, esta alcanza unos 5 kWh/m² diarios (1 825 kWh/m² al año), distribuida en todo el territorio nacional, por lo que se califica de buena comparada con otras regiones europeas en las que esta fuente ha alcanzado un alto nivel de aplicación. La radiación solar varía tan poco, de un lugar a otro del país, que se estima menor de 8% en

más de 97% en todas las zonas de la isla (Figueredo, 2010). Esto se muestra en el mapa de la figura 1. También se observa que las regiones centro y oriental del país son las que por su condición geográficas reciben más radiación solar.

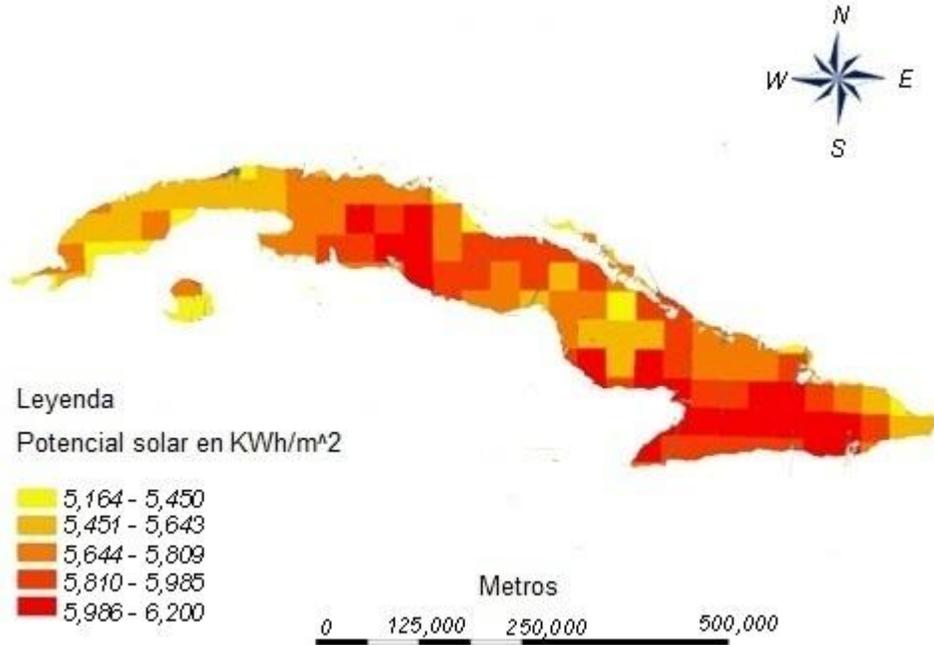


Figura 1. Mapa de distribución de radiación solar en Cuba.

Algunos esfuerzos ya se han realizado, como son la incorporación de 59 parques fotovoltaicos de los cuales 33 serán concluidos este año. Estos serán sincronizados al sistema electroenergético nacional con una potencia de 59 MW, equivalente a la mitad de una planta eléctrica de generación convencional (Cubadebate, 20-1-2017). Aunque aún son escasos estos esfuerzos, teniendo en cuenta las características anteriormente citadas.

También se utilizan para llevar electricidad a lugares montañosos y aislados de la red eléctrica nacional, como son escuelas rurales, casas intrincadas, señalizaciones marítimas, instalaciones agropecuarias entre otras. Este trabajo se centrará en dos casos de estudio fundamentales: las casas aisladas y las instalaciones pecuarias. Aunque es extensible a todas las antes mencionadas.

Los sistemas fotovoltaicos permiten la generación de electricidad a partir de la radiación solar, donde uno de los principales objetivos es que se tenga una mayor captación de

energía solar durante la mayor parte del día (Tovar, 2016). Para lo cual se debería usar seguidores solares.

Los seguidores solares son dispositivos empleados en los sistemas fotovoltaicos, para mantener el módulo fotovoltaico perpendicular a los rayos del sol y así aumentar el tiempo en que estos entregan su potencia máxima. Estos pueden ser seguidores de un solo eje y de dos ejes. Haciendo que aumente la eficiencia de los módulos en un 28% y un 35% respectivamente.

Aunque ya nuestro país cuenta con instalaciones fotovoltaicas a pequeña y a gran escala, como son los parques solares fotovoltaicos y la electrificación de objetos sociales aislados respectivamente; se presenta el siguiente **problema científico**:

No se cuenta en ninguno de estos casos con dispositivos de seguimiento solar, los cuales traen consigo el incremento de la captación de energía y la disminución de los costos de la instalación, además permiten que con el mismo módulo fotovoltaico obtener más energía.

Hipótesis: Es posible diseñar un sistema de control de posición del panel solar de manera que se logre incrementar la captación de la energía fotovoltaica disminuyendo el costo por kW/h captado y por consiguiente la inversión inicial

En este trabajo se propone los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Diseñar el control de posición de paneles solares fotovoltaicos en aplicaciones de uso aislado.

Objetivos Específicos:

- Seleccionar los elementos de la instalación fotovoltaica para los casos de estudio.
- Analizar las estrategias más utilizadas para el seguimiento del PMP.
- Modelar el panel solar fotovoltaico y el convertidor CD/CD.
- Diseñar el sistema de control de posición del panel solar fotovoltaico
- Implementar el algoritmo de control de posición del panel en la plataforma Arduino.

Este trabajo cuenta con la siguiente estructura:

INTRODUCCIÓN: se aborda la importancia, actualidad y necesidad del tema a investigar, así como el problema científico a resolver, la hipótesis y los objetivos propuestos.

CAPÍTULO I: Se hará una revisión bibliográfica del tema de estudio, analizando sus antecedentes y posibles aplicaciones. Así como un análisis de las posibles estrategias de control, además de las utilizadas en la actualidad. Una vez vistas estas y los casos de estudio con sus requerimientos, se hace una selección de la más eficiente.

CAPÍTULO II: Se utilizará para la selección de los elementos del sistema solar fotovoltaico, así como los del sistema de seguimiento solar, para lo cual se hace un estudio del movimiento del sol a través de la bóveda celeste.

CAPÍTULO III Se expondrán los resultados de la investigación, las conclusiones y recomendaciones.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos anteriormente expuestos se propone ejecutar las siguientes tareas:

- Elaboración y presentación del Proyecto de Tesis.
- Análisis de la literatura especializada.
- Selección de los elementos del sistema según la demanda de los casos de estudio.
- Simulación del panel y el convertidor en Matlab Simulink
- Diseño del sistema de control de la posición con dos grados de libertad.
- Implementación del sistema en una plataforma Arduino
- Resultados y conclusiones
- Elaboración y presentación del informe

CAPÍTULO 1. DESARROLLO Y CONTROL DE LA CAPTACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

1.1 Introducción

En este capítulo se abordan los antecedentes históricos de la energía solar fotovoltaica, como esta se transformó en un recurso utilizable y objeto de investigación y desarrollo debido a sus potencialidades y características ecológicas. Además se analizan las diferentes estrategias y algoritmos de control para seguidores solares, con el fin de aumentar la eficiencia de los módulos fotovoltaicos empleados en los casos de estudio que se describen.

1.2 Desarrollo en la obtención de energía solar fotovoltaica

El efecto fotovoltaico fue descubierto en 1839 por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel, cuyos estudios sobre el espectro solar, magnetismo, electricidad y óptica son el pilar científico de la energía fotovoltaica. En 1883, el inventor estadounidense Charles Fritts construyó la primera celda solar con base en un semiconductor de selenio (Se) con una capa delgada de oro (Au) obteniendo una eficiencia del 1%.

Años después, en 1914, el físico sueco Sven Ason Berglund patentó un método, cuyo objeto del mismo era incrementar la capacidad de las células fotosensibles; lo cual fue determinante para que el ingeniero alemán Bruno Lange desarrollara una célula solar usando dióxido de cobre en 1931. Este hecho dio pie a la creación de la primera célula moderna por parte de Russel Ohl (1898-1987) en el año 1946, tras más de diez años de investigación en el campo del comportamiento de los diferentes tipos de cristales.

En 1954, en los laboratorios Bell se experimentaba con semiconductores y accidentalmente se encontró que el Silicio (Si) con algunas impurezas era muy sensitivo a la luz. Los resultados obtenidos contribuyeron a la producción comercial de paneles solares, lográndose una eficiencia del 6% (Fuentevilla et al., 2012).

1.3 Evolución de los sistemas de control en instalaciones fotovoltaicos

La viabilidad de la energía solar fotovoltaica y sus aplicaciones depende en gran medida de la cantidad de energía captada y por esto la necesidad de desarrollar sistemas de seguimiento solar, que sean capaces de seguir perpendicularmente la trayectoria del sol durante el día y a través del año, para así maximizar la eficiencia energética. Por ejemplo varias ideas han sido propuestas para optimizar el ángulo de inclinación y orientación del colector solar diseñado para distintas latitudes geográficas o posibles periodos de utilización. (Lee et al., 2009), (Yakup and Malik, 2001).

En 1975 uno de los primeros sistemas de seguimiento solar automáticos fue presentado por McFee (McFee, 1975), (Semma and Imamura, 1981) en el cual se desarrolló un algoritmo para calcular la energía total recibida en un punto central, utilizando espejos para enfocar el sol. Mediante el algoritmo podía ser ajustada la dirección de dichos espejos. Algunos años más tarde, Semma and Imamru usaron un simple microprocesador para ajustar adecuadamente la posición de un panel fotovoltaico apuntando el sol todo el tiempo, (Badescu, 2008). Luego en 1986, Akhedyarov (Akhmedyarov, 1986) mostró el primer incremento de potencia en Kazakhstan de 350W a 500W utilizando un sistema de seguidor solar con control en lazo cerrado.

Estos sistemas han sido registrados en la literatura, clasificándose en sistemas de lazo cerrado y sistemas en lazo abierto. En el anexo 1 se muestran algunos de estos.

En 1992, Enslin (Enslin, 1992) aplicó el principio de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés) para realizar un convertidor que transformara la salida de voltaje del panel solar al voltaje requerido por la batería. Este sistema consistía en dos partes fundamentales: un convertidor conmutado y una sección de control de seguimiento. El objetivo del algoritmo MPPT es proveer un voltaje constante en la entrada

de manera que del panel se obtenga el máximo posible de energía. El convertidor fue controlado para seguir el punto máximo de la fuente de entrada ante variaciones de los parámetros de entrada y salida ahorrando el 15% en un sistema de 3 a 5 kWh/día.

En 1998, Khalifa y Al-Mutawalli (Khalifa and Al-Mutawalli, 1998) desarrollaron un sistema de seguimiento de dos ejes para aumentar el rendimiento termal de un concentrador solar parabólico. El sistema de seguimiento fue conformado por dos subsistemas idénticos mostrados en el anexo 2, cada subsistema constaba de dos foto-transistores adyacentes separados por una pared. Durante la operación de seguimiento la diferencia de señal de voltaje de los dos foto-transistores fue amplificada usándolas como señales de mando para mover el colector alrededor del eje correspondiente mientras la diferencia de voltaje se hace cero, indicando que los rayos del sol son perpendiculares.

1.4 Máxima eficiencia de los sistemas fotovoltaicos

Para lograr la máxima eficiencia de un panel solar solo hay tres vías, una es modificando su estructura, o sea, los compuestos internos de su celda por otros más eficientes o su estructura física de forma que absorba más radiación solar. Lo cual es difícil, costoso y lleva años de investigación y desarrollo. Otra vía es logrando que el módulo se mantenga entregando la máxima potencia sin importar las variaciones en la carga, que se logra usando controladores de seguimiento del punto de máxima potencia. La otra vía, es usando los paneles disponibles en el mercado, haciendo que estos sigan perpendicularmente al sol mientras este está en el firmamento, logrando un mejor aprovechamiento de la radiación emitida por éste. Es esta la razón por la cual se han llevado a cabo las anteriores y otras muchas investigaciones y desarrollo de seguimiento solar y control del punto de máxima potencia. Esto último, hoy día se ha logrado realizar con bastante eficiencia y viene implementado por lo general en todos los módulos de generación fotovoltaica, ya sea en el convertidor DC/DC o en un controlador específicamente diseñado para esta función. Mientras que para lograr la perpendicularidad de los paneles fotovoltaicos al sol, aún se desarrollan diferentes estrategias y algoritmos de control que son implementados en los seguidores solares (Hussein et al., 1995).

1.5 Estrategias de control en seguidores solares

Un seguidor solar es un dispositivo mecánico capaz de buscar la posición del Sol en cualquier momento del día, siguiéndolo desde el Este hasta el Oeste (Tovar, 2016).

Está conformado básicamente por una parte fija y una móvil, la cual cuenta con una superficie de captación que debe permanecer perpendicular a los rayos del Sol durante el día y dentro de su rango de movimiento. Estos tienen como finalidad el aumento de la captación de radiación solar; para ello hay dos movimientos que se deben controlar durante el día: el Azimut y la elevación del Sol.

Para el control de dichos seguidores solares es necesario tener en cuenta, tanto el tipo de movimiento que realizan, como el algoritmo que siguen para realizar dicho movimiento.

1.5.1 Estrategias de control según el tipo de movimiento.

Seguidor de un solo eje:

La rotación de la superficie de captación se hace sobre un solo eje, este puede ser azimutal, horizontal o polar como se muestra en la figura 2 (Yaguachi and Armando, 2015). Este tipo de seguimiento representa un mínimo grado de complejidad y su costo es menor en comparación con otros tipos de seguidores. La limitación de este tipo de seguidor consiste en que no puede realizar un seguimiento completo del sol ya que solo puede seguir ya sea la azimut o la inclinación solar, pero no ambas (Tovar, 2016).

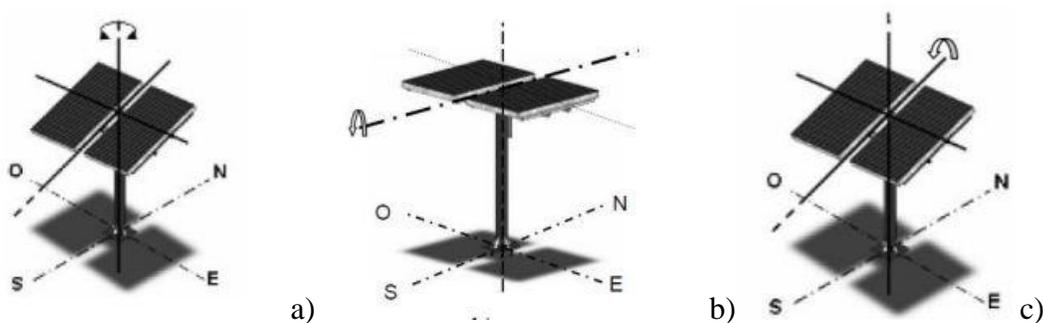


Figura 2. Seguidores solares de un eje: a) azimutal, b) horizontal, c) polar

Seguidor de dos ejes:

Este tipo de seguidor cuenta con dos grados de libertad mostrado en la figura 3 está en capacidad de realizar un seguimiento total del sol, tanto en inclinación como en azimut, aunque el rendimiento de la instalación puede ser superior en comparación con los de un solo eje, es importante mencionar que el de dos ejes resulta ser más costoso.

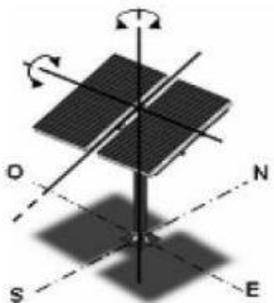


Figura 3. Seguidores solares de dos ejes (Yaguachi and Armando, 2015).

Teniendo en cuenta que el seguimiento por un solo eje aporta un 28% más de energía y el seguimiento por dos ejes un 35% además, que la demasía de costo una vez decidido implementar seguimiento solar no es considerable con respecto a los beneficios, es una mejor opción implementar seguimiento por dos ejes.

1.5.2 Estrategias de control según el tipo de algoritmo de seguimiento.

Existen varios algoritmo de control para los seguidores solares. Estos pueden ser por luminosidad , mediante reloj solar o con programación astronómica. A continuación se describen dichos algoritmos:

Según la luminosidad:

El algoritmo de este tipo de seguidor basa su funcionamiento en la señal entregada por uno o varios sensores, dependiendo de dicha señal se envía un comando de control a uno o varios motores para que se posicionen en el punto más adecuado de luminosidad. Este tipo de seguimiento resulta ser de fácil implementación.

Mediante reloj solar:

Este tipo de seguimiento está sujeto a la unidad de tiempo de 24 horas, variando su posición respecto al ciclo día de esta unidad, con un seguimiento efectivo de 12 horas en las que debe girar 180° , (15° por hora), sin considerar cambios de condiciones climáticas repentinas debido a que no se apega a un estudio preliminar del clima.

Con programación astronómica:

Este tipo de seguidor presenta una total independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de sensores que indiquen cual es el punto más luminoso. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del Sol en cualquier momento. Aunque este tipo de seguidor resulta ser de gran precisión cabe mencionar que la implementación del algoritmo representa un alto grado de complejidad

Si se comparan estos algoritmos, puede notarse que los seguidores por punto luminoso presentan una mayor facilidad para implementar el algoritmo de seguimiento, pero tienen poca fiabilidad; mientras que con una programación astronómica poseen una mayor fiabilidad, aunque es un poco más difícil la implementación de su algoritmo de seguimiento.

Teniendo en cuenta esto, para este proyecto se trabajará con el algoritmo de programación astronómica, dado las ventajas que ofrece este al sistema en cuanto a la eficiencia y a la posibilidad de ubicarse frente al sol con independencia de las condiciones climatológicas

1.6 Revisión actual de los métodos de control de posición en seguidores solares

En 2012, Jonathan Sumano, presentó en sus tesis de maestría un trabajo de diseño y construcción de un sistema de seguimiento fotovoltaico basado en el algoritmo de programación astronómica. El cual fue implementado con un microcontrolador que recibía los parámetros calculados mediante el puerto serie de una PC. Obteniendo así, un sistema automático de posicionamiento.

En 2015, Andrea Salazar, (Salazar, 2015) presentó un trabajo sobre control de la posición de un módulo fotovoltaico. El sistema controla la posición de manera continua utilizando

un motor de corriente directa y un Arduino donde se implementaba el algoritmo de reloj solar.

Naveen, M. Ahmed Ali Baig y Ashutosh Saxena,(Naveen, 12-2016) en la Conferencia Internacional sobre Innovación en Ingeniería Mecánica y Civil efectuada en Joinly en diciembre del 2016, presentaron el trabajo "A Novel Scheme For Dynamically Tracking Solar Panel" donde se analizan diferentes variantes de controlar la posición del panel solar proponiendo uno sobre la base de la utilización de GPS.

1.7 Casos de estudio

1.7.1 Energía solar para casas aisladas de la red eléctrica nacional

Parte del interés de desarrollar las energías renovables en Cuba radica en llevar esta hasta comunidades aisladas geográficamente de las redes de distribución de energía eléctrica, para ello se ha hecho fundamental énfasis en la energía solar. Las condiciones geográficas de nuestro país favorecen el uso de esta energía debido a los altos niveles de radiación solar que recibe el territorio de Cuba en toda su extensión durante todo el año. Además de ser esta muy robusta y estar al alcance de la producción nacional.

A diferencia de otras aplicaciones los hogares consumen corriente eléctrica durante todo el día lo cual es una dificultad por el hecho de que el Sol solo incide sobre el lugar durante unas 10 h. Esto hace necesario el uso de baterías, que permitan almacenar energía durante el período diurno para ser consumida luego en la noche. Lo trae consigo que el módulo fotovoltaico tenga que ser capaz de abastecer de energía simultáneamente durante el día los equipos consumidores de la casa y a la vez de un excedente que permita cargar las baterías como se muestra en la figura 4. El controlador es el que se encarga de estas operaciones de carga y descarga de la batería en dependencia de las necesidades demandadas por la carga.

La trayectoria del Sol hace que los paneles solares fijos tengan la mayor eficiencia solo durante unas tres o cuatro horas al día, por lo que la demanda de KWh/día que debe suministrarse tenga que ser suplida con la incorporación de más paneles al módulo fotovoltaico. Otra alternativa sería hacer que estos sean más eficientes, lo cual es fácil de lograr haciendo que el módulo siga perpendicularmente al sol mientras este esté en el

firmamento, aumentando así la eficiencia del sistema hasta un 35% aproximadamente.

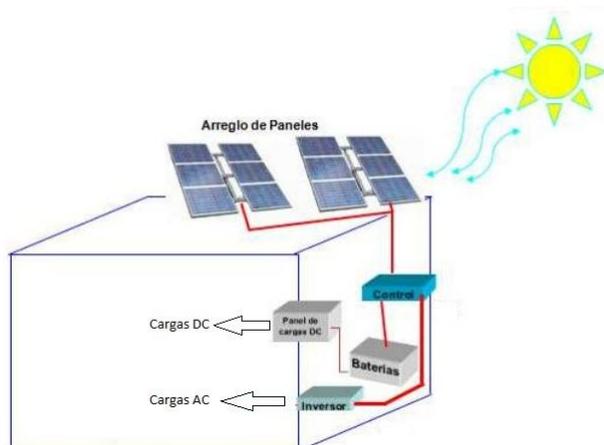


Figura 4. Funcionamiento de la energía solar doméstica.

1.7.2 Bombeo solar para entidades agropecuarias

Con el auge de las energías renovables y la búsqueda de una mayor eficiencia energética, nacen los sistemas de bombeo solar, una solución que utiliza paneles fotovoltaicos para obtener la energía suficiente del sol para hacer funcionar una bomba de agua y extraer la cantidad necesaria para regar varias hectáreas o abastecer una determinada cantidad de animales.

Con este tipo de aplicaciones, los sistemas de bombeo eliminarían el consumo energético elevado que supone mantener un sistema de abastecimiento continuo durante horas ininterrumpidas, que a veces conlleva el uso de grupos electrógenos para funcionar. Es por esto que el bombeo solar es la solución perfecta para estas circunstancias, ya que sólo es necesario la instalación de unos paneles solares, una bomba de agua y opcionalmente un inversor, como se muestra en la figura 5.

La inversión por tanto es inicial, además el mantenimiento de este tipo de soluciones es mínimo, ya que funciona exclusivamente con energía solar.

En este caso, la ubicación geográfica de los centros ganaderos imposibilita llevar hasta ellos redes eléctricas convencionales o lo que es lo mismo tener respaldo eléctrico, por lo que es

necesario aprovechar al máximo las horas de luz diurna, siendo imprescindible el uso de seguidores solares.

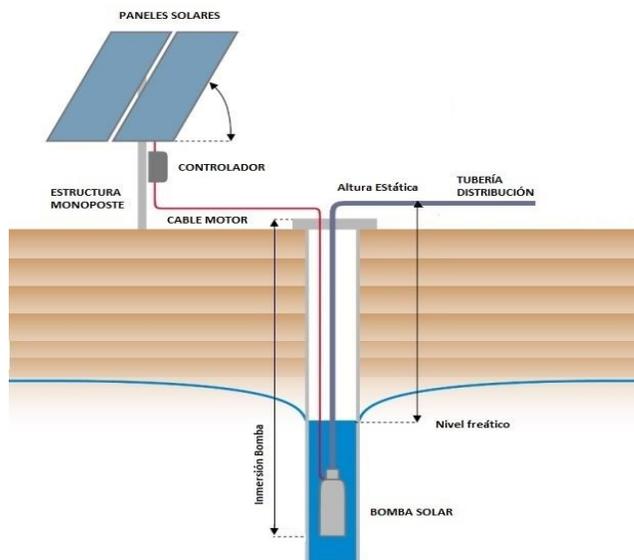


Figura 5. Diagrama de funcionamiento del bombeo solar.

1.8 Consideraciones finales del capítulo

- La energía solar fotovoltaica es un tema actual de investigaciones y desarrollo, en cuanto al aumento de la eficiencia para su viabilidad como energía del futuro. Donde el control de la posición trae grandes ventajas y es pobremente explotado.
- El control de la posición de los módulos fotovoltaicos, es una solución que trae consigo el aumento de la eficiencia del sistema. Lo cual es imprescindible en aplicaciones que no tienen respaldo de la red eléctrica convencional.
- Dada la necesidad de aumentar la eficiencia energética en las aplicaciones analizadas y vistas las posibilidades, tanto de tipo de seguimiento solar como de algoritmo de control se propone en este trabajo implementar la solución de seguimiento por dos ejes y con programación astronómica, pues se eleva la eficiencia hasta un 35% y no se depende de las condiciones meteorológicas

CAPÍTULO 2. ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CON CONTROL DE POSICIÓN

2.1 Introducción

En este capítulo se hace la selección tanto de los elementos del sistema solar fotovoltaico, para los dos casos de estudios ilustrados en el capítulo anterior, como los elementos de hardware del sistema de control y accionamiento. Esto con el fin de lograr aumentar la eficiencia energética del sistema.

2.2 Selección de los elementos del sistema solar fotovoltaico

En el caso de una instalación de energía solar fotovoltaica autónoma (aislada de la red), es fundamental un correcto dimensionamiento tanto para poder abastecer con garantías la demanda energética que tengamos, como también para ajustar el costo económico de la instalación.

Es necesario tener en cuenta por una parte la demanda energética y por otra parte las posibilidades de obtención de la misma, tanto en cantidad como en las horas establecidas.

En dependencia de la zona en que se ubiquen los paneles existirá un horario en el cual se puede obtener energía, generalmente de 8 AM a 5 PM con intensidad variable, donde la máxima disponibilidad se dará alrededor de las 12 M.

La demanda también cambia con la aplicación así como con el horario, por lo que en algunas aplicaciones no se requiere de baterías de almacenamiento o sólo las capaces de garantizar la fiabilidad del conjunto.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos de pequeña potencia suelen configurarse en corriente continua, 12 /24 voltios. Sí la potencia de la instalación aumenta, es conveniente aumentar el voltaje de trabajo con el fin de conseguir disminuir las pérdidas por caídas de tensión, que se producirían en los conductores si trabajaran a tensiones bajas.

Los pasos a seguir en la selección pueden variar de acuerdo a la aplicación pero de manera general puede consistir en los siguientes:

- Paso 1 Identificación del recurso solar disponible en la zona
- Paso 2. Estimación del consumo
- Paso 3. Determinación de la capacidad de generación fotovoltaico necesaria
- Paso 4. Selección del sistema de acumulación
- Paso 5. Diseño o selección del regulador
- Paso 6. Selección del inversor, en caso de ser necesario

2.2.1 Identificación del recurso solar disponible en la zona

De acuerdo al mapa de incidencia solar en Cuba, se puede obtener la siguiente información respecto a la energía con que se cuenta en el área donde se ubica la casa:

Los niveles de irradiación oscilan entre 5 y 6KWh/m² aproximadamente en todo el territorio nacional. De acuerdo a estos valores se seleccionará la condición de trabajo más desfavorable que se pueda presentar, para así satisfacer cualquier ubicación a lo largo del territorio. Por lo que se trabajará con el nivel más bajo de irradiación solar 5KWh/m² con la finalidad de dimensionar los recursos necesarios. Por tanto $I_d = 5KWh/m^2$.

2.3 Estimación del Consumo

En la casa para la cual se planifica esta aplicación los propietarios plantean la necesidad de contar con energía eléctrica para la conservación de sus alimentos (un refrigerador), la

iluminación en el horario nocturno y estar al tanto del acontecer diario. La tabla 1 a continuación muestra las cargas que serán alimentadas por el sistema fotovoltaico de acuerdo a las necesidades expresadas por el propietario de la vivienda, considerando el período que serán usadas cada una de estas.

Tabla 1. Equipos que funcionarán con la energía solar fotovoltaica.

Cantidad	Equipo	Potencia (Watts)	Horas de funciona diario	Energía requerida wh/día
3	Luminarias LED	9	6	162
1	Televisor	60	3	180
1	Refrigerador	65	12	780

Conocidos todos los aparatos, potencias y tiempos de uso, la expresión para calcular la energía de consumo, distinguiendo entre los aparatos de corriente alterna y continua será:

$$E_T = E_{DC} / \eta_{BAT} + E_{AC} / (\eta_{BAT} \cdot \eta_{INV}) \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde:

- E_T : Energía real requerida por el sistema (consumo en Wh)
- η_{BAT} : Rendimiento de la batería
- η_{INV} : Rendimiento del inversor
- E_{AC} : Energía consumida en AC (Wh)
- E_{DC} : Energía consumida en DC (Wh)

La energía real requerida E_T , refleja la energía que el sistema demanda en su conjunto en un día (Aguilera 2011, Egido Lorenazo 1996). Para este sistema $E_t = 1.49KWh/día$.

2.4 Dimensionamiento del Generador Fotovoltaico

Una vez que la demanda energética de la carga es conocida, se está en condiciones de dimensionar el generador fotovoltaico.

El número total de módulos fotovoltaicos (A_r) que se deben instalar, se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$A_r = P_p \times E_d / (e_{panel} \times e_{batería} \times I_d) \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Donde:

- A_r : Tamaño del panel (Wp)
- P_p : potencia proporcionada por el panel [Wp/m^2]
- E_d : Consumo de electricidad (kWh/día)
- e_{panel} : eficiencia del panel
- $e_{batería}$: eficiencia de la batería
- I_d : Irradiación ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$)

El tamaño de un sistema FV está dado por el Watt Pico (Wp). Esta es la salida máxima de un panel FV bajo condiciones estándar, que son: temperatura ambiente de 25°C y $1000 \text{ Watt}/\text{m}^2$ de irradiación.

La fórmula supone una eficiencia del sistema de aproximadamente 8% que se basa en la eficiencia del panel (10%) y la eficiencia de la batería (80%). Otro dato que se asume es la potencia proporcional de los paneles por metro cuadrado de 100 Wp.

En la fórmula anterior, el factor para calcular el tamaño del sistema no es 1000 (que significaría una eficiencia del sistema de 10%) sino 1200 porque la eficiencia del sistema es siempre un poco más baja que la eficiencia del panel.

Por lo que para los casos de estudio esta fórmula puede ser reducida a la siguiente expresión:

$$A_r = 1200 \times E_t / I_d \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Aplicando valores $A_r = 357.6\text{Wp}$

Conociendo el número de total de paneles que forman el generador fotovoltaico y la tensión nominal de la batería, que se acopla con la tensión nominal de la instalación mediante un convertidor DC/DC, se puede determinar si es necesario agrupar los módulos en serie y en paralelo.

En este caso no habrá que conectar en serie, pues se usará un convertidor DC/DC para llevar la tensión del módulo de 23.5V a 12V. Por lo que solo se usará el arreglo en paralelo para alcanzar la potencia demandada, el cual se calculará mediante la ecuación 2.4.

$$N_p = A_r / P_m \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Siendo:

- N_p : número de paneles en paralelo
- P_m : potencia del módulo fotovoltaico (Wp)

$$N_p = 1.986 \approx 2$$

Para cubrir la demanda se instalarán 2 módulos en paralelo de 180 Wp modelo DSM-180 (23)-C producidos en Cuba (Electrónicos, 2014), por un costo total de \$ 600. Este arreglo será instalado en paralelo, suministrando una potencia de 360Wp. Lo que permite cubrir la demanda de energía planificada, aunque esta tiende a sufrir fluctuaciones durante el año, tanto por efecto del clima como por variaciones en la carga. Esto puede ocasionar que en determinados momentos exista déficits de potencia, lo cual debe solucionar el usuario desconectando algún equipo o disminuyendo su tiempo de uso.

Numero Paneles = 2 paneles de 180Wp

2.5 Dimensionamiento del Sistema de acumulación. (Baterías)

Por fines prácticos se asumirá lo mínimo recomendable, sin embargo estará condicionado al conocimiento de los días sin brillo solar de la zona y de acuerdo a lo solicitado por el cliente, teniendo en cuenta este el incremento en los precios a mayor número de autonomía.

Por lo tanto, el tamaño de la batería se calculará de la siguiente manera:

$$\text{Tamaño} = (\text{Aut} \times \text{Et}) / (\text{Rend} \times \text{Desc}) \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde:

- Aut (Autonomía-días sin brillo solar) = 1
- Et = 1.49 kWh/día
- Rend (eficiencia de la batería) = 80%
- Desc (descarga de la batería) = 50%

Tamaño = 3.725kWh \approx 3730 Wh

Para esta aplicación seleccionaremos baterías “Concorde” de 12 V, 100 AH. Pues además de que Cuba ya tiene contratos con esta firma para la importación de la misma, se ha probado en otras aplicaciones su durabilidad y resistencia al uso prolongado.

El cálculo del número de baterías se hará mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Numero de Baterías} = \text{Tamaño} / (\text{Ah} \times \text{V}) \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Numero de Baterías = 4 por un precio total de \$ 400.

El arreglo de baterías será instalado en paralelo para el sistema de 12 voltios.

2.6 Selección del Regulador

Tabla 2. Cálculo la máxima potencia por tipo de energía

Cantidad	Equipo	Potencia (Watts)	Energía requerida wh/día AC	Energía requerida wh/día DC
3	Luminarias LED	9		27
1	Televisor	60		60
1	Refrigerador	65	65	

Potencia: 65 W 87 W

Para el sistema de 12 voltios, la máxima energía se dará por los paneles (360 Wp) a comparación de la potencia demandada por las cargas en CA (65 Wp) o en CD (140 Wp), por lo que nos permitirá obtener la máxima intensidad de corriente que deberá soportar el controlador.

$$I_G = A_r \cdot I_R = P_p / V_m \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Siendo

- I_G : Corriente producida por el generador (A)
- I_R : Corriente producida por cada rama en paralelo del generador (A)
- A_r : Número de ramas en paralelo del generador
- P_p : Potencia Pico del módulo fotovoltaico (W)
- V_m : Tensión nominal de los módulos (V)

$$I_G = 30A$$

El controlador deberá tener una capacidad de 30 A por lo que se selecciona el regulador Schneider XANTREX modelo C35 (Schneider, 2015) el cual puede asumir cargas de 35A y 12V en CC.

2.7 Selección del Inversor

La potencia que atenderá el inversor, en forma simultánea de todos los equipos en AC será de 65 W, por lo que se seleccionará un inversor “Inversor Salmex de la serie SOLSUM 6.6F (Samlex, 2017) con potencia nominal continua de 70 W, 12 V_{DC} de entrada y salida 220 V_{AC} a 60 Hz. El precio de este es de \$122.

2.8 Análisis para el caso del bombeo solar

2.8.1 Identificación del recurso solar disponible en la zona

En el caso del abastecimiento de agua al ganado mediante el bombeo solar, el aspecto de la identificación del recurso solar disponible es igual al caso de la vivienda. Pues a lo largo del territorio nacional este varía poco. Por tanto se tomará $I_d = 5KWh/m^2$.

2.8.2 Identificación de la demanda energética para el bombeo de agua.

El departamento de servicios técnicos de la delegación municipal de agricultura en Remedios necesita abastecer de agua nuevas fincas ganaderas, para cubrir las necesidades del ganado vacuno y a la entidades como tal. Bajo estas tierras hay un excelente manto freático, pero estas quedan aislados de la red eléctrica nacional, lo que impide que esta agua sea extraída por medios convencionales de bombeo, o sea, bombas eléctricas conectadas a la red nacional. La inversión es alta y la rentabilidad de llevar a estos campos la electricidad por vías convencionales es muy baja, por lo que queda descartado. Es necesario pensar en otras alternativas, donde la más práctica, eficiente y ecológica es la energía solar eléctrica.

En la tabla 3 se muestra el estado actual de los centros agropecuarios, ahí se incluye la cantidad de animales, demanda de agua, entre otros parámetros de interés para el diseño del sistema de bombeo solar. En esta zona el manto freático se encuentra a unos 15 m de profundidad normalmente, en los tiempos de sequía este tiende a bajar unos 2 ó 3 metros. El departamento de servicios técnicos cuenta con bombas de agua ECDRIVE 1200-HR que son capaces de entregar hasta 21 metros cúbicos por hora, y presiones de hasta 240 metros de columna de agua, dependiendo del modelo de la bomba.

Tabla 3. Características de las unidades agropecuarias en estudio.

Nro	Unidades	Profundidad en m.	Gasto lts/seg	Almacenamiento Cap. Tanque (lts)	H ₂ O/Día lts	Cantidad de animales
1	UEB Centro de desarrollo de novillas Vieta	14	2	20000	6100	51
2	UEB Vaquería La Esperanza	12	2	20000	7440	62

Para este proyecto en particular se planea utilizar el modelo HR-14 mostrado en la figura 6, lo cual se hace previendo la duplicación del ganado que se ha planificado para los próximos

años. Este incremento de la masa ganadera trae consigo un aumento proporcional de la demanda de agua diaria, por lo cual se estima que estará alrededor 14000 lts/día.

Generador solar	Altura de transporte	5 m 16 ft		10 m 33 ft		15 m 50 ft		20 m 65 ft		30 m 100 ft		
	Generador solar conducido	no	sí	no	sí	no	sí	no	sí	no	sí	
Caudal [m³/día]												
350 Wp	Radiación kWh/ m ² /día	7,5	52	78	22	30	23	29	18	26	14	20
		6,0	43	62	19	26	18	24	15	20	10	14
		4,5	33	44	16	22	14	19	10	14	6	8
	Tipo de bomba	C-SJ8-5				HR-14						
	Caudal máx. [l/min]	125			47		40		36		30	
Sección cable/largo máx.	4mm ² / 60m #12 / 200ft											
420 Wp	Radiación kWh/ m ² /día	7,5	60	90	26	31	24	30	20	29	16	23
		6,0	50	72	22	27	19	25	17	24	12	17
		4,5	39	53	17	24	15	21	14	19	8	11
	Tipo de bomba	C-SJ8-5				HR-14						
	Caudal máx. [l/min]	135			43		42		38		34	
Sección cable/largo máx.	4mm ² / 60m #12 / 150ft											

Figura 6. Fragmento de tabla de selección de las bombas PS 1200.

Para esa aplicación se seleccionó la bomba PS 1200 HR-14 (Lorentz, 2014), pues esta puede bobear 14 mil litros de agua, funcionando a plena capacidad durante unas 9h al día, transportando está a una altura de 20 m, lo cual es suficiente para la profundidad estándar de los pozos de la zona, más la altura de los tanques de almacenaje.

Esto plantea un problema y es que los paneles fijos solo dan su máxima eficiencia durante unas 3 o 4h máximo al día, mientras los rayos solares son perpendiculares a estos. Lo cual tiene dos soluciones: una es aumentar la potencia del sistema a 420 Wp, como se muestra en la figura 6. De forma tal que en las horas en que el sol está más llano con respecto al terreno estos sigan sufriendo de energía suficiente a la bomba o hacer que con el sistema seleccionado se pueda cubrir la demanda energética con su generación pico, siguiendo perpendicularmente al sol durante su recorrido por el firmamento. Opción ésta más eficiente, económica y recomendable.

El módulo PS 1200 HR/C está formado por la bomba sumergible de la capacidad seleccionada y un controlador que trae implementado el algoritmo MPPT y otras prestaciones como detección de marcha en seco y mando a distancia.

2.9 Hardware de control

En el mundo actual hay muchos microcontroladores y plataformas microcontroladoras preensambladas, como son Parallax Basic Stamp, Phidgets entre otros, con grandes capacidades y ofertas de funcionalidades similares. Arduino es otra de estas plataformas microcontroladoras, con la característica de ser de código abierto, basada en hardware y software flexibles y fácil de usar.

Todos estos pueden ser programados y diseñados de forma tal que puedan recibir información del medio externo (a partir de sensores), procesar esta información y reaccionar de acorde a ésta manipulando disímiles actuadores para controlar procesos y variables de interés.

2.9.1 Plataforma de prototipos electrónica Arduino

Para este proyecto se ha elegido una placa Arduino UNO mostrada en la figura 7. Ya que esta ofrece una gran compatibilidad con todos los módulos que existen en el mercado enfocados a Arduino, es de bajo costo y fácil de programar.

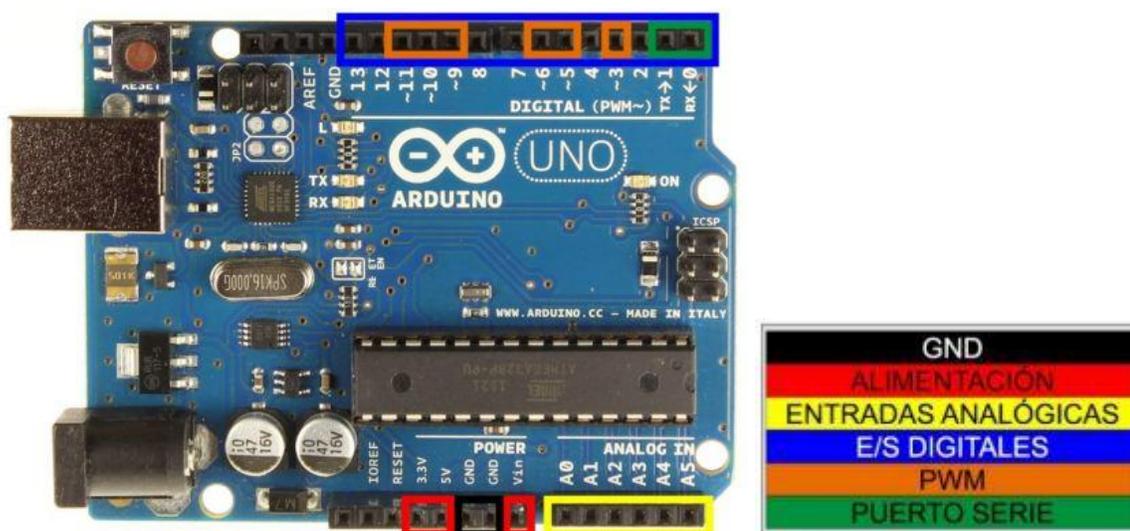


Figura 7. Plataforma de desarrollo Arduino UNO.

Arduino puede tomar información del entorno que lo rodea a través de sus pines de entrada, a los que se le puede conectar una amplia gama de sensores y transductores. Del mismo

modo, puede actuar sobre dicho entorno mediante sus pines de salida. Con ellos es posible controlar luces, motores, relés, altavoces y todo tipo de actuadores.

El microcontrolador de la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino. Es un lenguaje de alto nivel con unas sentencias y sintaxis muy similares a las de lenguaje C. También posee un entorno de desarrollo basado en Processing, que permite la edición de un programa con el lenguaje Arduino, su verificación, compilación y la grabación sobre el controlador.

Dicho entorno es código abierto y está disponible para plataformas Windows, Mac, etc. Una vez grabado el programa en la memoria del controlador, éste se ejecuta sin necesidad de estar conectado a un ordenador. Tenemos así un proyecto hardware/software totalmente autónomo.

El hardware de Arduino está basado en el procesador ATMEL, un chip sencillo y de bajo coste que permite el desarrollo de múltiples diseños. Según ha ido avanzando el tiempo, el procesador se ha ido actualizando hasta llegar al modelo Atmega1280 con mejores prestaciones, como por ejemplo más memoria flash.

En el anexo 3 se muestran características más específicas de la placa.

2.10 Software de programación

El entorno de desarrollo (IDE) de Arduino mostrado en el anexo 4, lo constituye un editor de texto, donde se plasmará el código, un área de mensajes y la barra de herramientas con sus menús.

Arduino se programa en C++, admitiendo la gran mayoría de bibliotecas usadas en C++ y todas sus funciones básicas. Todos los programas tienen siempre la misma estructura:

Setup(). La función setup() se establece en cuanto se inicia el programa. Se usa para iniciar variables declaradas anteriormente, asignar pines, cargar bibliotecas, etc. Esta función solo se ejecuta una vez desde que se conecta la placa a la alimentación o se reinicia.

Loop(). Una vez inicializados y preparados todos los valores y funciones necesarias, esta función se ejecuta sucesivamente hasta la desconexión de la placa.

2.11 Reloj de tiempo real

Arduino incorpora sus propios temporizadores, uno de ellos manejado por la función `millis()`. Pero estos son contadores que cuando se inician empiezan desde 0, por ejemplo, una vez conectada la alimentación del Arduino, Este contador se encarga de indicar cuánto tiempo lleva encendido Arduino y una vez se pierde la alimentación, este valor desaparece. Por lo que para proyectos en donde se necesita usar el tiempo como variable se necesita usar un RTC (en inglés, real-time clock,) externo que posea una batería para almacenar los datos (Arduino, 2014). En específico se usará RTC DS1307 mostrado en el anexo 5, que incorpora la pastilla RTC y la batería de respaldo en un mismo módulo.

2.12 Estudio del movimiento solar para el control de la posición del panel

Cada día, el Sol, para un observador situado en la tierra, sigue una trayectoria circular a través del firmamento alcanzando su punto más alto al mediodía. Por otra parte, esta trayectoria circular aparente, se mueve hacia puntos más altos en el firmamento a medida que el invierno se acaba y llega el verano. Estos desplazamientos se pueden observar en el esquema de la figura 8.

En este esquema, durante el verano, el amanecer acontece más temprano, y el atardecer más tarde.

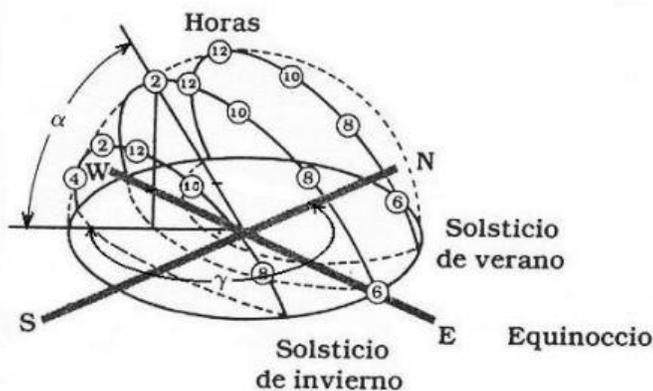


Figura 8. Movimiento del sol a lo largo del día

De la misma forma que para determinar la posición de un punto cualquiera sobre un plano se utiliza un eje de coordenadas cartesianas, para localizar con exactitud cualquier punto de la superficie terrestre, se emplea un sistema de coordenadas geométricas expresadas mediante una pareja de números denominados latitud y longitud, los cuales expresan mediciones angulares sobre la superficie de la esfera. La tierra tiene forma de esfera y como tal sus dimensiones se pueden medir en grados. Así, representada como mapa, la tierra se divide en 360° . La ventaja que tiene emplear expresiones angulares, es que, el ángulo formado por dos rectas es independiente de la longitud de éstas. Por ejemplo en navegación astronómica no importa a la distancia a que se encuentran los astros de referencia, sino el ángulo que forman estos con respecto al lugar de observación.

Cualquier lugar en la tierra puede ser situado exactamente por la intersección de dos coordenadas que representan la latitud y longitud de ese lugar, figura 9. Indicando cada número la cantidad de grados norte o sur dese el ecuador (latitud) y este u oeste desde el meridiano 0° (longitud). Así pues, latitud y longitud son expresiones angulares, indicadas en grados, minutos y segundos. En la figura se muestran dos esquemas representativos de los ángulos de latitud ϕ y longitud L . (ARQHYS, 12-2012)

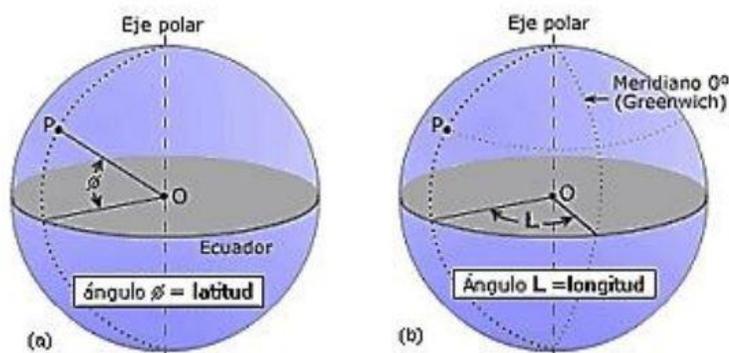


Figura 9. Muestra de la latitud ϕ y longitud L .

2.12.1 Ángulo de declinación δ

La declinación define la posición angular del sol al mediodía solar, es decir, en el momento en que el sol está más alto en el firmamento con respecto al plano ecuatorial; en la figura 10 se muestra un ejemplo de ángulo de declinación solar hacia el norte.

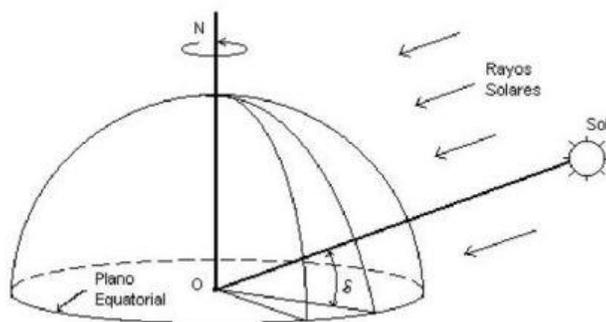


Figura 10. Ejemplo de ángulo de declinación δ .

La declinación es un índice de alejamiento que experimenta el sol hacia el norte o hacia el sur de ecuador. Este parámetro depende del día del año, y puede calcularse mediante la ecuación 2.8.

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen}\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde n es el día del año. Cada grado (indicado por el símbolo $^{\circ}$) se divide en 60 minutos (indicados por comilla simple) y cada minuto en 60 segundos (simbolizados por comilla doble).

2.12.2 Posición solar en relación a la tierra

La órbita de la tierra alrededor del sol es elíptica como se observa en la figura 11, además el eje de rotación de la tierra (eje polar) está siempre inclinado 23.45° en relación con el eje elíptico.

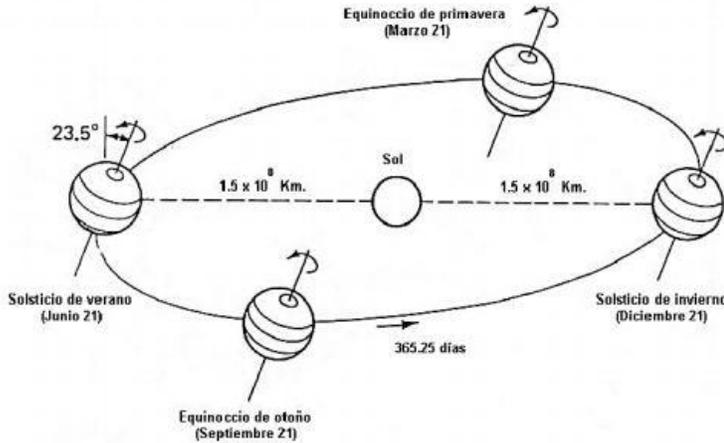


Figura 11. Órbita terrestre alrededor del sol.

2.12.3 Ecuación del tiempo

Un parámetro que tiene que ser considerado en este análisis es la hora solar, la cual difiere de la hora oficial que indica un reloj exacto. Ambas están relacionadas por la ecuación 2.9

$$\text{Hora Solar} = \text{Hora oficial} + \left(\frac{E}{60}\right) + 4(L_{\text{ref}} - L_{\text{loc}}) * 24/360 \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Donde E es la ecuación del tiempo plateada en la ecuación 2.10, en minutos; L_{ref} es la longitud del meridiano de referencia horaria oficial para la zona en cuestión, y L_{loc} es la longitud del meridiano del lugar, en grados oeste. Una forma de evaluar el valor de la ecuación de tiempo E, en minutos, es mediante la siguiente ecuación empírica:

$$E = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Donde:

$$B = \frac{360}{364}(n - 81) \quad \text{para} \quad n = \text{Día del año} (1 \leq n \leq 365) \quad (\text{Ecuación 2.10.1})$$

2.12.4 Ángulo horario ω

Por otra parte, el ángulo horario es igual a cero al medio día solar y adquiere un valor de 15° de longitud por cada hora, siendo positivo en las mañanas y negativo en las tardes, así $\omega = 30^\circ$ a las 10:30 y $\omega = -15^\circ$ a las 13:00.

Una forma de calcular el ángulo horario ω considerando que a las 6:00, 12:00, 18:00 horas se tiene 90° , 0° , -90° respectivamente, es por medio de la siguiente ecuación 2.11.

$$\omega = -\left(\frac{15^\circ}{hr}\right) * (hora\ solar) + 180^\circ \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

2.12.5 Altura α y Azimut solar γ

Dado que los movimientos de la tierra y el sol son relativos entre sí, en este análisis se supondrá que la tierra está fija en el espacio, que el Sol describe un movimiento virtual alrededor de ésta, y que el origen de coordenadas se localiza en el lugar de interés situado en la tierra. Desde este punto de vista tolemeico, el Sol está restringido a moverse con dos grados de libertad en la esfera celeste. En consecuencia, su posición en el firmamento queda descrita mediante dos variables angulares: la altura α y el azimut γ . Estos dos parámetros son muy importantes pues son los que definen el movimiento del seguidor solar de dos grados de libertad. Como se desprende de la figura 12, la primera de estas variables define el ángulo que forma la visual al sol con el horizonte, en cuanto la segunda define el ángulo de desviación de los rayos del sol con el norte verdadero. El ángulo preciso de estas variables depende fundamentalmente de tres parámetros: la latitud φ , la desviación δ y el ángulo horario ω (A Georgiev, 2004).

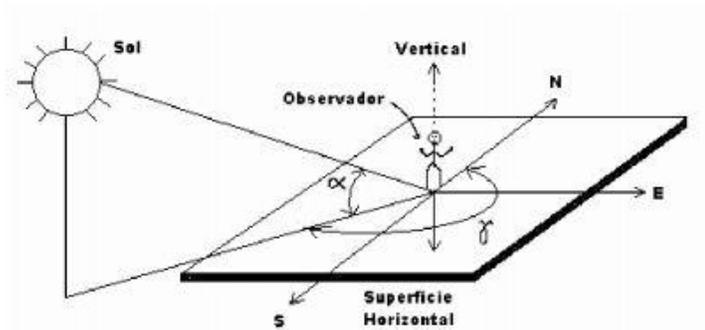


Figura 12. Angulo de posición solar.

Una vez determina la latitud φ , la desviación δ , el ángulo horario ω ; la altura solar α y el azimut γ , se pueden determinar por medio de las siguientes relaciones trigonométricas.

$$\sin \alpha = \cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega + \sin \varphi * \sin \delta \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Finalmente, debe aplicarse una función inversa cuando el ángulo azimut es mayor a 90°, lo cual ocurre cuando la posición del sol rebasa el eje o plano vertical este-oeste, bajo el siguiente razonamiento representado en las ecuaciones 2.14 a 2.16.

$$\text{si } \cos \omega < \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \implies \gamma = \sin^{-1} \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

En caso contrario,

$$\text{si } \cos \omega > \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \implies \gamma = 180^\circ - \sin^{-1} \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

Por otro lado,

$$\gamma < 0, \implies \gamma = 360^\circ + \gamma \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

2.13 Estructura de sujeción del módulo FV y sus mecanismos de seguimiento.

Los mecanismos de seguimiento solar fotovoltaicos son tantos y tan disímiles como sean capaces de proyectarlos todos aquellos que se den a la tarea de aumentar la eficiencia de dichos módulos siguiendo la trayectoria solar. Para la elaboración de este mecanismo se debe tener en cuenta que tipo de seguimiento se quiere hacer, de un eje o de dos. Pues de esto dependerá la estructura en sí, para un eje el sistema solo tiene que ser capaz de moverse de Este-Oeste, mientras que para cubrir los dos ejes tiene que lograr seguir al sol tanto en su movimiento Este-Oeste como Norte-Sur. Este diseño debe ser suficientemente sencillo y fácil de implementar para no aumentar drásticamente el costo de la instalación FV, a la vez de robusto y confiable, pues muchas veces estos están aislados de cualquier ayuda técnica necesaria en caso de avería.

La estructura de la figura 13 se basa en un soporte tubular (2) anclado a una base de concreto (1) mediante tornillos empotrados en dicha base. En el extremo superior del pedestal (2), van ubicado los mecanismos de giro, tanto horizontal como vertical.

Primero se encuentra el mecanismo de accionamiento horizontal (3), el cual está conformado por un motor paso a paso con un tornillo sinfín acoplado a la salida. Dicho

motor se encuentra fijo al pedestal. Por otro lado, la parte móvil, consta de una rueda dentada que le permite girar un ángulo de 240° al módulo fotovoltaico, suficiente para realizar el seguimiento acimutal de Este a Oeste. Dicha rueda esta acoplada a la articulación de movimiento horizontal (7), la cual se acopla mediante un rodamiento al pedestal.

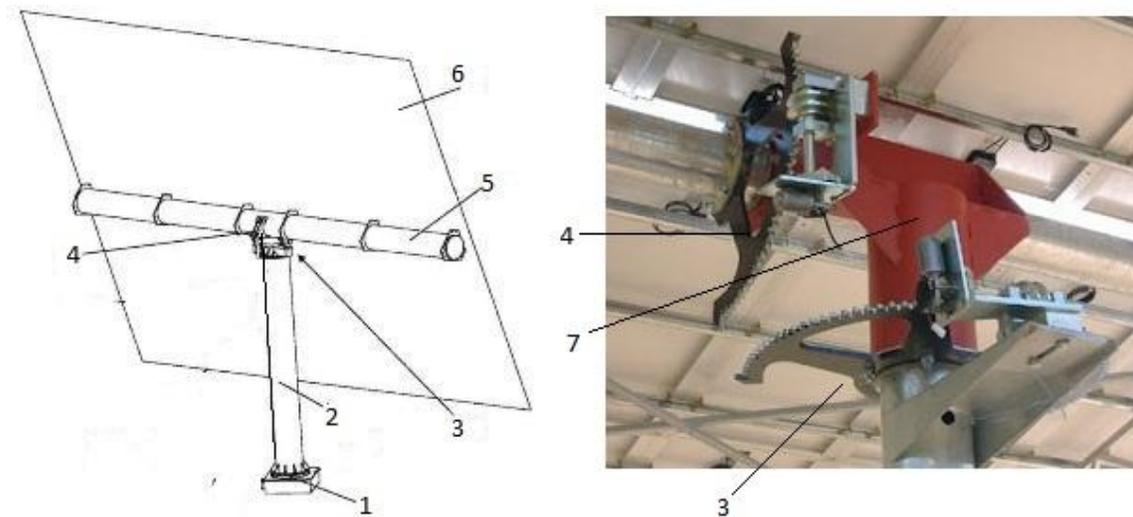


Figura 13. Estructura de sujeción y mecanismos de seguimiento del módulo FV.

Luego se encuentra el mecanismo de seguimiento vertical, o de la altura (4). El cual está conformado por un motor paso a paso que tiene un tornillo sinfín acoplado a la salida. Este conjunto esta fijo a la articulación de movimiento horizontal (7) y se acopla a una rueda dentada fija a la estructura del panel (6) mediante el eje de giro vertical (5). Dicho eje se sostiene mediante dos pedestales que le brindan movilidad con rozamiento despreciable.

2.14 Estructura mecánica

Para el diseño de la estructura mecánica debemos recordar que se trata de un sistema que debe tener dos grados de libertad, para seguir tanto el ángulo de elevación como el azimutal, para ello se realiza el análisis de las fuerzas que intervienen en cada uno de los ejes considerando la posición más crítica que coincide con la vertical como se muestra en la figura 14.

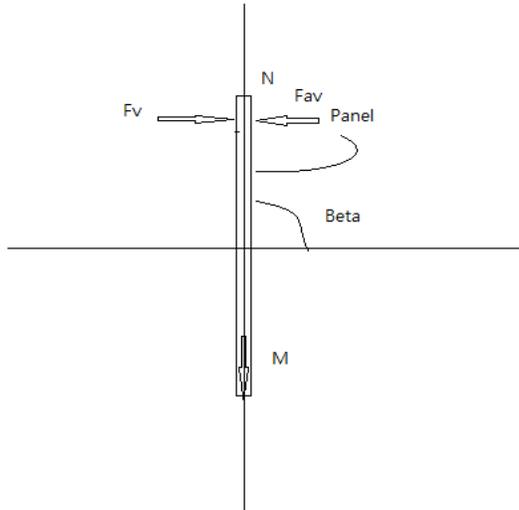


Figura 14 Diagrama de fuerzas que actúan sobre el panel solar en su posición más crítica.

Fuerzas que afectan el ángulo azimutal:

Para que el sistema esté en equilibrio en la posición azimutal debe cumplirse las siguientes ecuaciones

$$\sum F_y = 0 \quad N_o = Mg \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

$$\sum F_x = 0 \quad F_v = F_{av} \quad (\text{Ecuación 2.18})$$

Donde M es la masa del panel y g la gravedad =9.81 m/s²

Con el valor de 15.8 kg de masa del panel No= 155 N

Conociendo la distancia entre el mecanismo situado en el eje y el módulo solar podemos, determinar el momento

La fuerza ejercida por el viento Fv se determina mediante la expresión

$$F_v = A * P \quad (\text{Ecuación 2.19})$$

Donde:

- A es la proyección del área frente al viento
- P es la presión que ejerce el viento.

Para la determinación de la presión se emplea la fórmula genérica utilizada en la aerodinámica y que expresa:

$$P = \frac{C_d \cdot \rho \cdot V^2}{2} \quad (\text{Ecuación 2.20})$$

Donde:

- ρ densidad del aire seco = 1.223 Kg/m^3
- V velocidad del viento
- C_d coeficiente aerodinámico de resistencia al avance, que para una superficie plana es 1.17

Suponiendo una velocidad de aires de 30 km/h

$$V = 8.33 \text{ m/s} \quad \text{y} \quad P = 49.6 \text{ N/m}^2$$

Para las dimensiones del módulo 1.51×1.22 y sustituyendo en 2.19

$$F = 91.45 \text{ N}$$

El momento será obtenido por el producto de la fuerza por la mitad de la longitud del modulo

$$\tau_d = 91.45 \times 1.51 / 2 = 69.05 \text{ Nm}$$

Para el ángulo de declinación el caso extremo ocurrirá cuando $\text{Beta} = 0$

$$F_y = 155 \text{ Nm}$$

El momento se obtiene con la mitad del ancho

$$\tau_d = 94.5 \text{ Nm}$$

La velocidad del panel para seguir el sol por el ángulo azimutal es de $15^\circ/\text{h}$

$$\omega_a = 15^\circ/\text{h} = 7.27 \times 10^{-5} \text{ r/s}$$

La potencia requerida será 0.005 w, que resulta muy baja por lo que la selección del motor se debe hacer sobre la base del momento a desarrollar

2.15 Mecanismo de accionamiento

El mecanismo de la figura 15, conformado por un tornillo sinfín (1) va montado en el eje motor, haciendo girar la corona que es el eje de salida (2). Este mecanismo no puede funcionar en sentido contrario, es decir, es irreversible. Con este mecanismo, se consigue transmitir fuerza y movimiento entre dos ejes perpendiculares, con relaciones de transmisión muy elevadas.

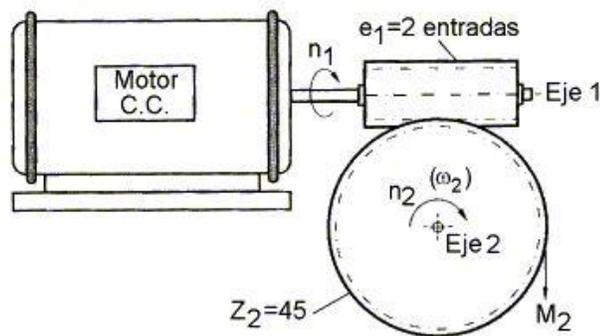


Figura 15. Engranaje de acople del motor con el módulo FV mediante Tornillo sinfín.

Mientras los tornillos de fuerza son generalmente de rosca simple, los tornillos sinfín tienen usualmente roscas múltiples. Al número de roscas de un tornillo sinfín se le llama número de entradas. Este valor determina la velocidad de giro de la corona de salida.

Si el sinfín es de una sola entrada, por cada vuelta que gira el tornillo, la corona avanza un diente. O lo que es igual para que la corona de una vuelta completa el tornillo sinfín ha debido girar tantas vueltas como dientes tiene la corona.

En el esquema de la figura 15 el sinfín es de dos entradas, por lo que cada vuelta de éste, la corona avanza dos dientes.

La velocidad de giro de ambos ejes dependerá del número de dientes de la corona (Z_2) como del número de entradas (e_1) del tornillo sinfín y viene dada por la ecuación 2.11.

$$n_1 * e_1 = n_2 * Z_2 \quad (\text{Ecuación 2.21})$$

Por lo tanto la relación de transmisión del sistema es:

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{e_1}{Z_2} \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

2.16 Motor paso a paso

Los motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieran movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez, por cada pulso que se le aplique. Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres.

Los motores paso a paso logran su mayor capacidad de torque a baja velocidad, a diferencia de otros motores que alcanzan su mayor torque a altas revoluciones. Estos tienen una característica adicional: el torque de detención (que se puede ver mencionado también como "par de detención", e incluso par/torque "de mantenimiento"), que no existe en los motores de CC. Esta característica es muy útil cuando el motor deja de moverse y, mientras está detenido, la fuerza de carga permanece aplicada a su eje. Se elimina así la necesidad de un mecanismo de freno. Características estas muy favorables en el caso de control de posición de los módulos FV.

Estos motores se dividen en dos categorías principales: de imán permanente y de reluctancia variable. También existe una combinación de ambos, a los que se les llama híbridos.

Los de imán permanente son los que más comunes. Como su nombre indica, poseen un imán que aporta el campo magnético para la operación. Estos se dividen a su vez en distintos tipos, diferenciados por el tipo de bobinado. Existen entonces motores paso a paso de imán permanente unipolares (también llamados "unifilares"), bipolares (también llamados "bifilares") y multifase.

2.16.1 Selección de motor

Del catálogo Motores paso a paso de la marca Changzhou Hepai Electric Motors 85BYGH se escoge el modelo 85BYGH45C-12 con los datos de chapa mostrados en el anexo 6 y un costo de 10CUC la unidad, todos los motores de este catálogo giran 1.8 grados por paso, el seleccionado posee las siguientes características

Con el ángulo de paso de 1.8° , la multiplicación por múltiplos de 5 ofrece relaciones enteras, con relación de 9:1 el conductor se desplaza 1° cuando el motor gira 5 pasos o 9° de desplazamiento

Con esta relación el momento del lado del motor será $\frac{\tau_a}{9} = 7.67 \text{ Nm}$

El motor seleccionado puede desarrollar de manera sostenida 9.3 Nm por lo que resulta adecuado para ambos movimientos

Se requiere entonces de un reductor de relación 9:1 lo que se puede lograr con un reductor de engranes con 180 dientes del lado conductor y 20 en el conducido

2.17 Consideraciones finales del capítulo

- Para aprovechar al máximo la instalación fotovoltaica es necesario hacer una selección lo más eficiente posible de los elementos del sistema, tanto fotovoltaico como de control.
- Los dispositivos de control con hardware y software libre son una buena solución para este tipo de aplicaciones, pues brindan las prestaciones necesarias sin elevar demasiado los costos de la instalación.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE CONTROL PARA EL MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO

3.1 Introducción

Los sistemas aislados de la red se complementan con baterías que le permiten almacenar la energía para emplearla cuando sea necesaria, pero no exista luz, por la noche o en momentos en los que las sombras cubran gran parte del generador. Los generadores de conexión a red, deben convertirla mediante un inversor para adaptar la energía generada a los parámetros de la red. Tanto un tipo como el otro, disponen de elementos de control para trabajar, en todo momento, en su punto de máxima potencia (PMP) para conseguir que el rendimiento del generador sea lo más alto posible, para ello, el propio inversor DC/DC lleva casi siempre un seguidor del punto de máxima potencia (MPPT) integrado para ajustar los valores de tensión, e intensidad, a los valores normalizados manteniendo la máxima potencia (variando la intensidad). Los sistemas, tanto aislados como de conexión a red, más sofisticados disponen, además, de un mecanismo de orientación que permite que apunten siempre hacia el Sol; de este modo, se consigue que reciban siempre la máxima radiación posible y aumentar, por tanto, el rendimiento.

Asociado a los paneles fotovoltaicos pueden existir dos sistemas de control independientes

- El control del punto de operación de los paneles es realizado por controladores de seguimiento del punto de máxima potencia también conocidos como controladores MPPT por sus siglas en inglés (Maximum Power Point Tracking).

- Control de la posición del panel de manera que se mantenga su superficie perpendicular a los rayos del sol.

Para el control del PMP (punto de máxima potencia) se han trabajado diferentes algoritmos como son el de la conductancia incremental y el de perturbación y observación (P&O) (Molina et al., 2007).

3.2 Algoritmos de control para el seguimiento del Punto de Máxima Potencia

El seguimiento del punto de máxima potencia implica que el sistema FV se opere siempre en la máxima relación de voltaje /corriente de salida. La simulación del sistema fotovoltaico proporciona medios flexibles para analizar y comparar el rendimiento de diferentes algoritmos de punto de máxima potencia cuando se opera bajo condiciones climáticas específicas. De aquí en adelante, se discuten los métodos de control del punto de máxima potencia principales, como lo es el método de “Perturbación y Observación” (PyO) y el método de “Conductancia Incremental” (CondInc).

3.2.1 Algoritmo de Perturbación y Observación (P&O)

Los algoritmos de PyO son ampliamente usados por su estructura simple y las pocas variables que se precisan medir, como se muestra en el anexo 7. El algoritmo opera perturbando periódicamente (incrementando o disminuyendo) el voltaje VA en los terminales del sistema fotovoltaico por medio del ciclo de trabajo del convertidor y luego comparando la potencia de salida PA del sistema, con la potencia del ciclo previo de perturbación PP. Si la potencia actual medida es mayor que la del ciclo anterior, la perturbación continuará en la misma dirección en el próximo ciclo, caso contrario la dirección de la perturbación se invertirá en el próximo ciclo. Esto significa que el voltaje en los terminales del sistema se ve perturbado en cada ciclo del seguimiento del punto de máxima potencia a intervalos de muestreo TS; por lo tanto una vez alcanzado el PMP, el algoritmo PyO oscilará alrededor de este punto resultando una pérdida de potencia del sistema fotovoltaico, especialmente en casos donde las condiciones atmosféricas son constantes o varían lentamente. Caso contrario, cuando las condiciones del entorno

cambian rápidamente, por ejemplo como resultado del movimiento de las nubes, se verifica que el algoritmo de PyO se desvía del PMP (Hussein et al., 1995). Este algoritmo puede operar equivocadamente en estos casos debido al hecho de que no es capaz de distinguir las variaciones de la potencia de salida del sistema fotovoltaico causadas por el ciclo de trabajo de aquellas causadas por la desviación de la radiación solar.

Según lo descrito por (Femia et al., 2004), se demuestra que los efectos negativos asociados con la utilización del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia tipo PyO pueden ser significativamente reducidos si la magnitud de las perturbaciones del ciclo de trabajo DD y el intervalo de muestreo T son modificadas según el comportamiento dinámico del convertidor de CC/CC empleado para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia.

3.2.2 Algoritmo de Conductancia Incremental (CondInc)

Con el propósito de solucionar los problemas mencionados anteriormente de los métodos de PyO (Hussein et al., 1995), propusieron el algoritmo de Conductancia Incremental (CondInc), el cual sigue el punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico usando un procedimiento diferente. El método se basa en el hecho de que en el punto de máxima potencia, la derivada de la potencia de salida del sistema fotovoltaico con respecto de la tensión es cero. Así, la tensión del sistema fotovoltaico puede ser regulada cercana a la tensión en el punto de máxima potencia midiendo la conductancia incremental, dI/dV , y la conductancia I/V .

El algoritmo, el cual se resume en el anexo 8, comienza su ciclo obteniendo los valores actuales (A) y previos (P) de I y V, esto es I_A , V_A e I_P y V_P respectivamente; luego usando estas mediciones se aproximan los cambios incrementales como:

$dI = I_A - I_P$ y $dV = V_A - V_P$. Posteriormente, se lleva la comparación principal entre dI/dV y $-I/V$ como se describe a continuación en la ecuación 3.1.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ En el punto.} \quad \frac{dP}{dV} > 0 \text{ A la izquierda.} \quad \frac{dP}{dV} < 0 \text{ A la derecha.}$$

3.3 Modelo de los componentes del sistema fotovoltaico

Cada aplicación de la energía solar fotovoltaica tiene distintos requerimientos de energía, además de funcionar en distintos puntos de operación cada momento, como consecuencia de los cambios de irradiación y temperatura. Motivos estos por los cuales para controlar el punto de operación es necesario conocer los modelos de los principales elementos del sistema, para así determinar en cada instante el punto de máxima potencia. Principalmente ante grandes variaciones de las condiciones meteorológicas o de demanda de la carga, situación en la que los controladores por si solos no son capaces de seguir el PMP. Para los casos de estudio los elementos fundamentales del sistema fotovoltaico son mostrados en la figura 16.

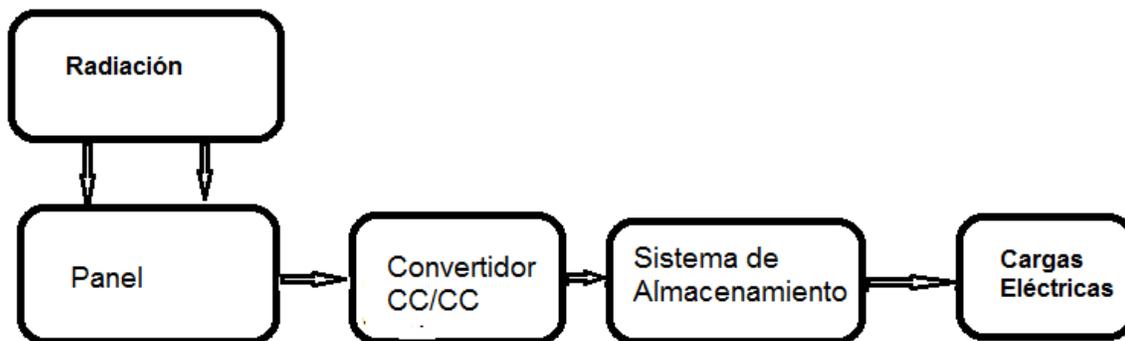


Figura 16. Componentes principales del sistema fotovoltaico

3.3.1 Modelado del panel

El panel solar constituye la fuente de energía del sistema fotovoltaico. El verdadero núcleo de la conversión de la luz solar en electricidad es la célula que al asociarse en serie y paralelo conforman el panel, es por ello que se debe partir, para la simulación de este de los elementos constitutivos.

La figura 17 muestra el circuito equivalente básico de una célula solar, formado por una fuente de corriente dependiente de la irradiancia, I_1 un diodo real, caracterizado por una corriente de saturación I_0 , un factor de idealidad η y dos resistencias de pérdidas R_s y R_{SH} .

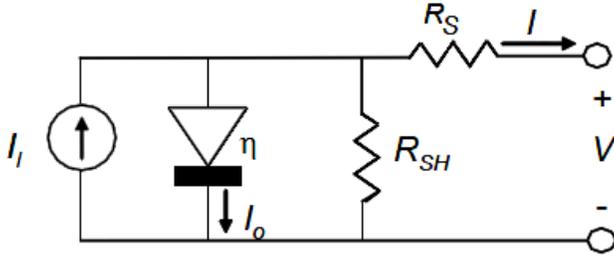


Figura 17. Modelo eléctrico básico de una célula solar

La ecuación 3.2 define el comportamiento de una célula solar:

$$I = I_L - I_o \cdot \left(e^{\frac{q(V+R_S I)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_{SH}} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Donde:

- $q = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{C}$: Carga elemental
- $K = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$: Constante de Boltzmann
- T : Temperatura en grados Kelvin
- n : Factor de idealidad del diodo
- I_L : Corriente fotogenerada
- I_o : Corriente inversa de saturación del diodo
- V : Tensión del panel
- I : Corriente del panel
- R_S : Resistencia interna en serie
- R_{SH} : Resistencia interna en paralelo

El panel fotovoltaico surge por la necesidad de adecuar los niveles de tensión y corriente del generador fotovoltaico a los requisitos del sistema eléctrico al cual alimenta. Para ello se disponen las celdas fotovoltaicas en serie o paralelo en función de las necesidades. La ecuación permite caracterizar el comportamiento de una agrupación fotovoltaica :

$$I = N_p \left(I_L - I_o \left(e^{\frac{\left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_S I}{N_p} \right)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{\frac{V}{N_s} + \frac{R_S I}{N_p}}{R_{SH}} \right) \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

La respuesta generalizada de voltaje contra corriente y voltaje contra potencia se muestra en la figura 18. En este gráfico se pueden determinar la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el

voltaje en circuito abierto (V_{oc}) y el punto de máxima potencia (MPP) con sus valores asociados I_{max} y P_{max}

El anexo 9 muestra el diagrama de simulación de un panel y el anexo 10 la asociación de 2 paneles.

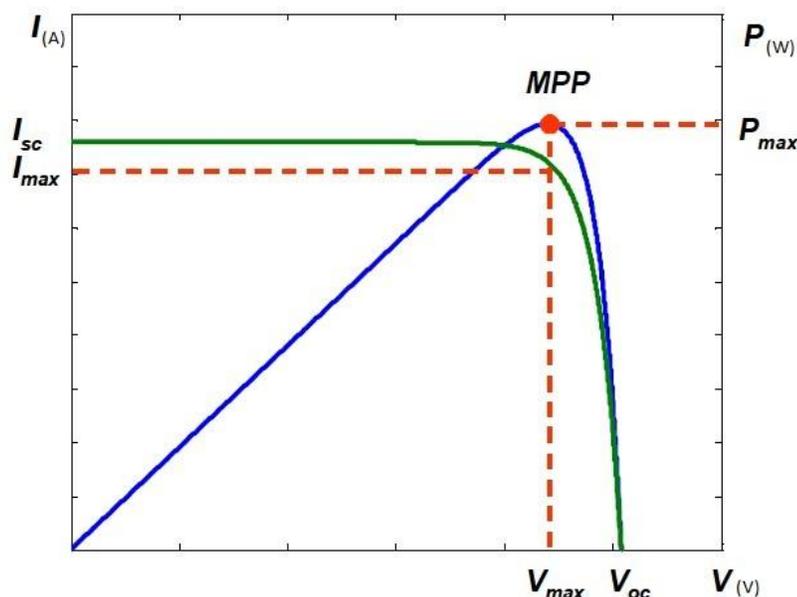


Figura 18. Respuesta generalizada del panel o de una asociación de paneles

3.3.2 Modelado del convertidor

Los convertidores CC/CC son circuitos electrónicos de potencia que elevan o disminuyen el nivel de tensión de continua que reciben para poder ajustarse a las características de tensión en la aplicación pertinente.

Para regular este nivel de tensión a la salida del convertidor se utilizan controles, específicamente diseñados para cada aplicación, que modulan la ancho de pulso (PWM) que recibe un elemento de conmutación (Femia et al., 2004).

Existen varios tipos de convertidores, los más utilizados son el convertidor Buck o reductor de tensión, el convertidor Boost o elevador y convertidores que cumplen la doble función y de reducción y elevación, Buck Boost.

En los convertidores CD-CD el objetivo del circuito de control es regular a la salida del convertidor ante variaciones del voltaje de entrada. Para tal efecto se actúa sobre el ciclo de trabajo del interruptor controlado generalmente por PWM. Generalmente la estrategia

consiste en comparar la tensión de referencia con la medición de ésta. El error es procesado por un controlador PI clásico o un controlador de histéresis. La salida del controlador es la referencia para un PWM que determina el estado del elemento de conmutación.

La principal dificultad cuando se utiliza un PI es la de diseñar el controlador, dado que la función de transferencia del controlador es no lineal y variante con el tiempo. Se diseña, generalmente, considerando un punto de operación y señales pequeñas

Cuando se usa un controlador de histéresis se presentan problemas con la frecuencia variable del interruptor y una mayor distorsión en la salida (Bortolotto, 2007).

3.3.3 Convertidor Buck

Uno de los convertidores más conocidos es sin duda el Buck o directo figura 19 (Femia et al., 2004), (Bortolotto, 2007).

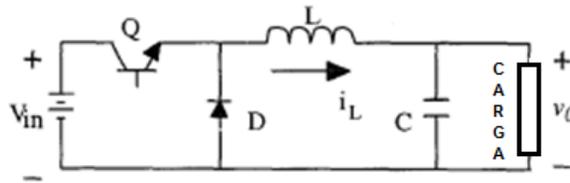


Figura 19. Convertidor Buck

En dependencia del estado del conmutador Q existen dos estados, uno con el interruptor abierto y otro con el interruptor cerrado. Donde sus relaciones en el espacio de estado son:

$$\text{En estado de conducción: } \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{in} - Vv_o), \quad \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - i_c) \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

$$\text{En no conducción: } \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(-v_o), \quad \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - i_c) \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Para este circuito se cumple la relación:

$$v_o = DV_{in} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

Siendo D la relación entre el tiempo de conducción T_{on} y el tiempo total del ciclo T

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

En el anexo 11 puede verse su diagrama de simulación en Simulink.

3.3.4 Convertidor Boost

Al convertidor Boost también se le conoce como elevador, pues su voltaje de entrada es menor que el de salida, el circuito tiene los mismos componentes del Buck lo que cambia es la posición de ellos como se muestra en la figura 20.

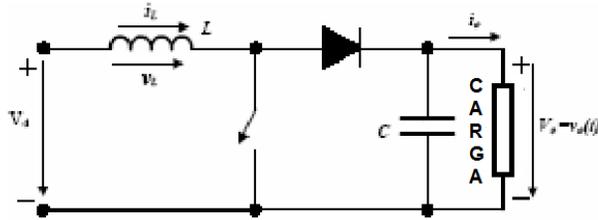


Figura 20 Convertidor Boost.

Para este convertidor la relación voltaje de salida voltaje de entrada es:

$$V_0 = \frac{V_d}{1-D} \quad \text{(Ecuación 3.8)}$$

En el espacio de estado:

$$\text{En el estado de conducción: } \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L}, \quad \frac{dv_C}{dt} = \frac{-i_C}{C} \quad \text{(Ecuación 3.9)}$$

$$\text{En no conducción: } \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} - \frac{V_o}{L}, \quad \frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - i_C) \quad \text{(Ecuación 3.10)}$$

El voltaje de salida del convertidor se puede controlar regulando el tiempo de conducción de los elementos conmutadores, lo cual se puede efectuar mediante la modulación por ancho de pulso (PWM).

3.3.5 Convertidores reductores elevadores

La figura 21 muestra el esquema electrónico de un convertidor Buck Boost elevador reductor, el circuito es el resultado de unir los dos componentes en serie

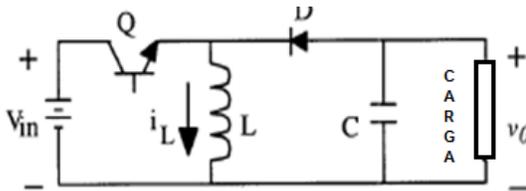


Figura 21. Convertidor reductor elevador Buck Boost

Ecuaciones de estado:

En el período de conducción: $\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}V_{in}$, $\frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{C}(-i_c)$ (Ecuación 3.13)

En el período de no conducción: $\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(v_0)$, $\frac{dv_0}{dt} = \frac{1}{C}(-i_L - i_c)$ (Ecuación 3.14)

3.4 Algoritmo aplicado para el control de la posición.

El algoritmo de control de la posición del módulo fotovoltaico mostrado en la figura 22, consta de tres bloques fundamentales:

El bloque de puesta a cero, es el que tras energizarse el módulo de control, da el mando para que el panel vaya hasta su posición cero, o sea, posición en la que acciona el interruptor de fin de carrera ubicado tanto en el eje Norte-Sur como en el eje Este-Oeste. Lo cual es una referencia para a partir de ésta, poder dar la acción de mando y llevar el módulo a la posición deseada. Antes de llevar el módulo a la posición deseada el software chequea que los datos del reloj de tiempo real no sean los datos por defecto, de ser así se queda esperando que le introduzcan los datos correctos para luego llevar el módulo hasta la posición correspondiente.

El segundo módulo es el de ajuste de parámetros, el cual chequea si el operador desea cambiar los datos temporales del RTC y de ser así reemplaza los datos viejos por lo que introduce el operador.

Luego el tercer módulo es el de control de la posición como tal, pues chequea los datos temporales y cada cuatro minutos corrige la posición en el eje Este-Oeste y luego Norte-Sur de azimut y elevación respectivamente. En ambos casos se calcula la posición para cada instante y se reajusta los ángulos de inclinación.

En el software de control fueron implementados los bloques funcionales anteriormente descritos y además otros que no intervienen en la lógica de control pero si en subrutinas internas que permiten el cálculo de parámetros, la obtención y conversión de datos e interacción con el operador. Por lo que para su posterior uso o estudio se ubicó en el anexo 12 el programa para Arduino de control de la posición del módulo fotovoltaico.

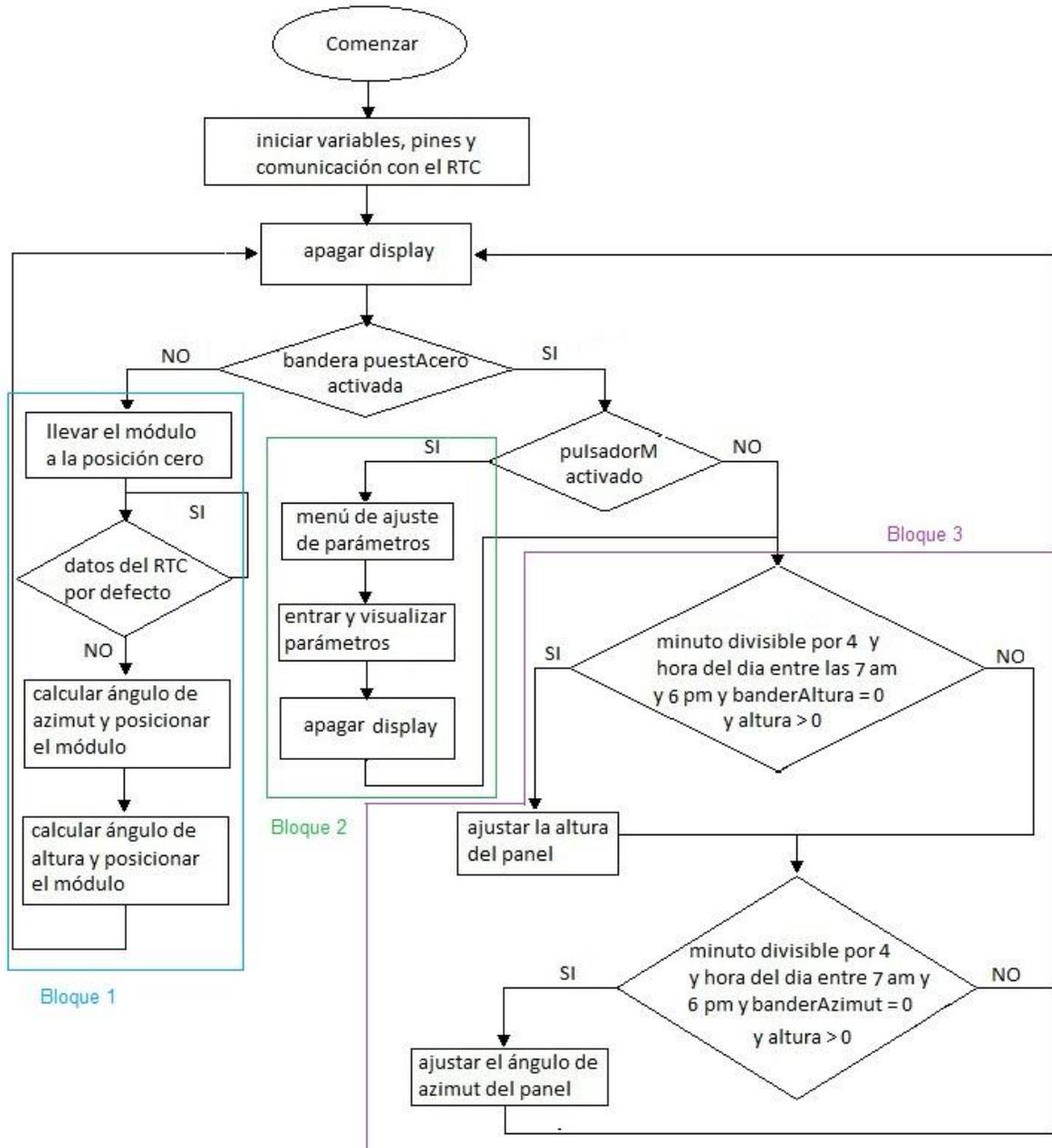


Figura 22. Diagrama de flujo del software de control del seguidor solar.

3.5 Validación del algoritmo y software de control aplicado

Para validar el algoritmo de control desarrollado se construyó una maqueta a escala del mecanismo de accionamiento la cual se muestra en el anexo 13. Esta maqueta cuenta con las mismas relaciones de engranaje que el mecanismo diseñado para mover el módulo fotovoltaico, por lo cual se asume que deben comportarse de forma similar. De esta forma,

si los resultados obtenidos en las pruebas con la maqueta son positivos, se puede afirmar que tanto el algoritmo planteado como su implementación en la plataforma Arduino están listos para controlar los módulos fotovoltaicos reales.

Inicialmente se implementó una estrategia de seguimiento basada en el avance de un grado cada cuatro minutos, a partir del concepto de que el sol avanza $15^\circ/h$ con respecto a la tierra. Pero como se aprecia en la figura 23 no se logra un seguimiento eficiente, ya que el avance acimutal del sol durante el día no es una función lineal.

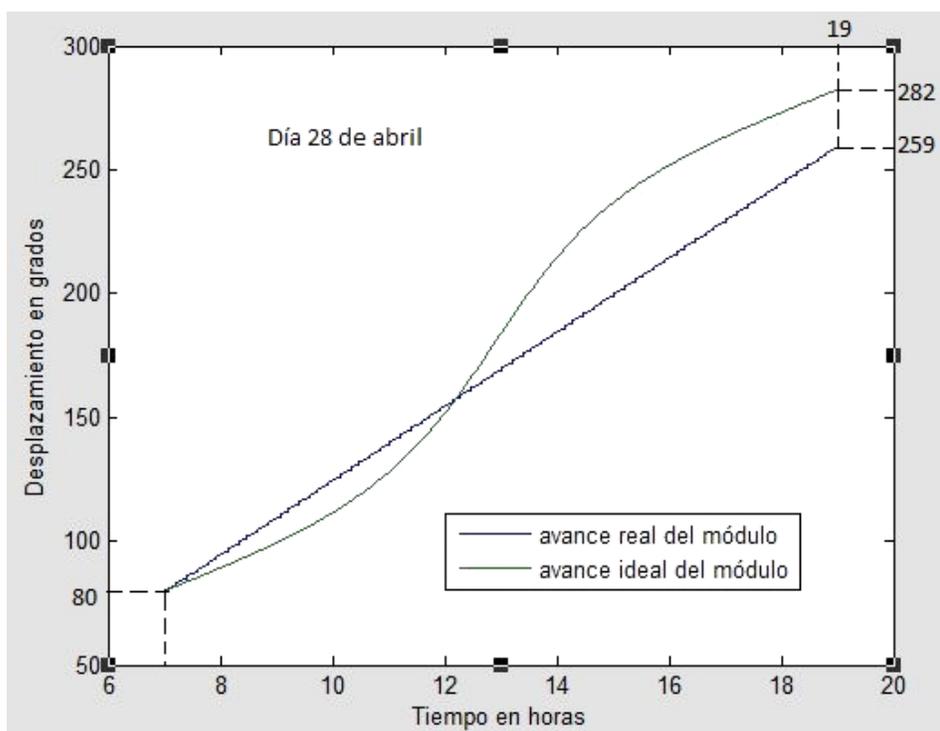


Figura 23. Seguimiento solar con avance de un grado cada cuatro minutos.

Luego se implementó la estrategia basada en el cálculo de la posición del sol cada cuatro minutos. Lo cual da como resultado un seguimiento solar preciso como se observa en la figura 24. En esta aparece la comparación entre el movimiento ideal que debería seguir el módulo solar y el real que realiza tras calcular y reajustar el ángulo azimutal cada cuatro minutos en los días correspondientes al 21 de marzo o septiembre, o sea durante los equinoccios.

Para la obtención de los datos experimentales se implementó una rutina en el controlador Arduino (solo para la fase experimental), de forma tal que cada minuto guardara su posición en un arreglo de 720 valores, equivalente a 12h y al final del experimento, este lo exportara hacia la computadora mediante la transmisión serie. También fue validado visualmente mediante un semicírculo graduado ubicado en la maqueta.

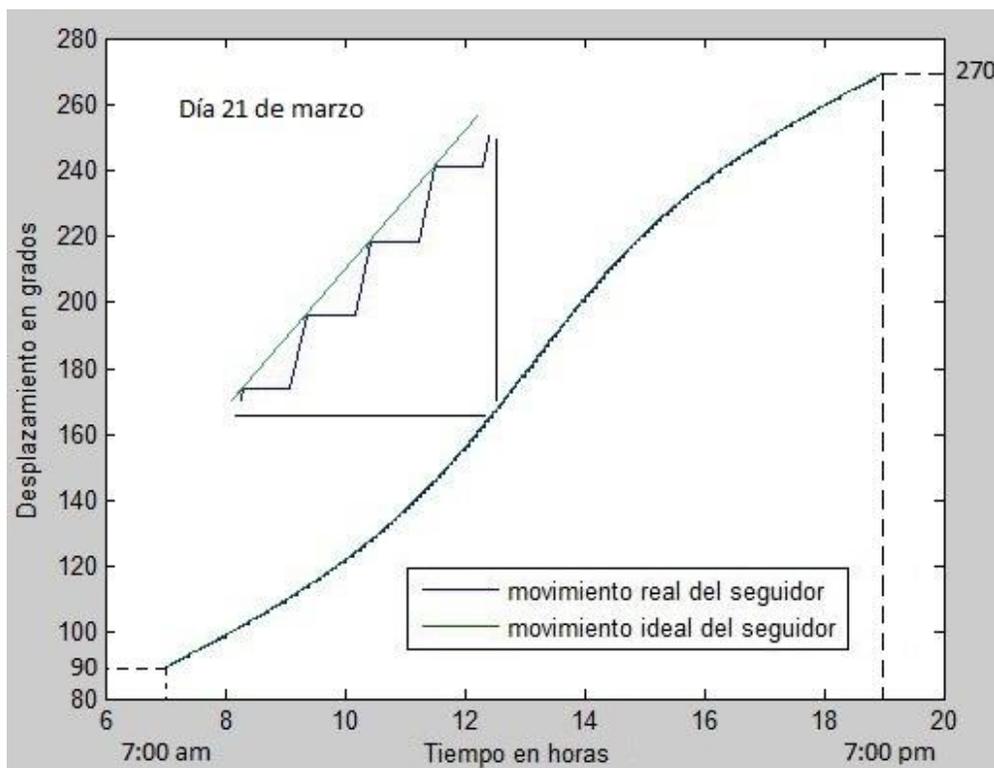


Figura 24. Comparación entre comportamiento ideal y real del seguimiento acimutal.

Dado que los datos fueron exportados cada un minuto como se observa en el anexo 14 y el mecanismo se comporta como un sistema de primer orden sin retardo con constante de tiempo igual a 0.025s, no se logra ver en la imagen la dinámica del sistema. Esta está representada en el anexo 15.

En la figura 25 aparece representado el avance del seguidor con respecto al ángulo de elevación. Este tiene implementado el algoritmo de cálculo y reajuste de la posición solar. También lo hace con una buena precisión ya que al tener el motor un avance de 1.8° por paso y una reducción el mecanismo de 9:1 le permite tener una resolución de 0.2° , suficiente para que el seguimiento tenga un error imperceptible.

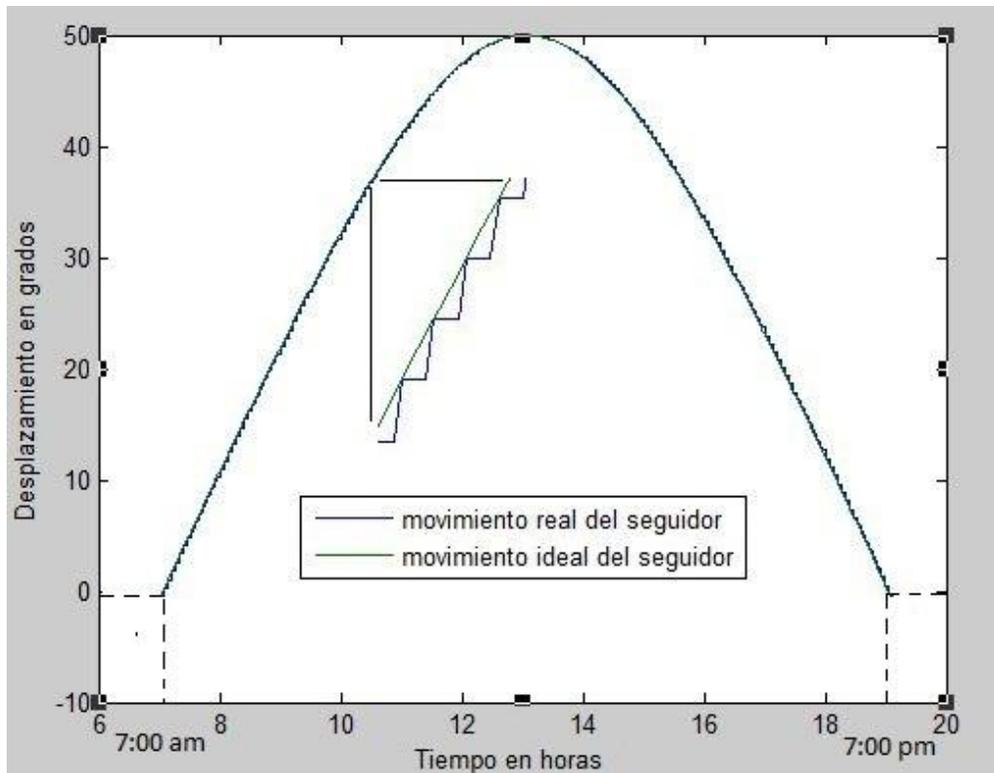


Figura 25. Comparación entre comportamiento ideal y real del seguimiento de la altura.

3.6 Análisis económico y medioambiental

La utilización de energía solar fotovoltaica en sí, ya genera un ahorro considerable de dinero. Sobre todo a largo plazo, pues el costo de instalación de los módulos fotovoltaicos se paga en un relativo corto período de tiempo, comparado con los aproximadamente 30 años que brindan energía eléctrica gratuita los mismos. Pero estos módulos por si solos desperdician gran parte de su potencial, pues solo trabajan a su máxima capacidad durante unas dos o tres horas al día, lo cual se mejora grandemente con la utilización de seguidores solares. Ellos traen consigo una pequeña inversión inicial adicional en concepto de equipamiento y estructura pero hace que el sistema trabaje con un 35% más de eficiencia durante su vida útil. Esto se traduce en que se puede generar la misma energía con menos paneles fotovoltaico, lo que disminuye los costos de instalación inicial, o en algunos casos amortigua el gasto de la instalación del seguidor solar.

Este aumento de la eficiencia también puede significar que se obtiene más energía de la que se necesita, lo cual en los sistemas conectados a red aporta beneficios extras en concepto de pago por inyección de energía a la red eléctrica nacional y bonificación por el factor de potencia, o en sistemas aislados que puede suministrarse energía a otros procesos si tener que agrandar el módulo fotovoltaico.

En el caso de estudio de la granja pecuaria o de las vivienda aislada de la red eléctrica nacional, si se fuera a suministrar energía eléctrica por las vías convencionales, lo cual no sería viable en muchos casos por la lejanía de estas a la red eléctrica nacional, habría que pagar por la instalación, que incluye las líneas de transmisión y el banco de transformadores. Luego por las pérdidas totales en el transformador de distribución, también una penalización por el factor de potencia y para finalizar, el consumo de corriente mediante la tarifa M3-A la cual se aplica a todos los consumidores clasificados como de Media Tensión o que alimenten equipos para el regadío agropecuario, ya sean estatales o campesinos particulares que posean esta instalación con metro independiente de la vivienda.

El precio del kilowatt está sujeto a un factor K, que depende del precio del petróleo y otros parámetros variables, lo cual hace que este precio sea inestable. Además se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se penaliza facturando la cuenta del mes al doble por cada kWh consumido, si se detecta el uso de las bombas de regadío en el horario pico.
- Si la demanda máxima real durante el mes es mayor que la contratada se facturará la diferencia a \$ 21.00 por kW, según corresponda.

Una vez vistas las ventajas económicas de la energía solar fotovoltaica, se hará un análisis de la viabilidad de adicionar un sistema de seguimiento solar.

Por ejemplo en el caso del bombeo de agua, para cumplir con la demanda diaria de agua se necesita un módulo de 420Wp lo cual representa la instalación de tres módulos de 180 Wp que son los producidos en Cuba. Cada módulo de estos cuesta 300CUC. Ahora, usando seguimiento solar solo se necesita una potencia de 350Wp, lo cual puede ser generado con dos módulos de 180Wp. Esto genera un ahorro de 300CUC, de los cuales hay que

descontar 20CUC de hardware de control y el circuito de acondicionamiento, 20CUC por los dos motores paso y 100 CUC por el costo de la estructura de seguimiento, dejando un ahorro final de 160CUC. Además el sistema de seguimiento diseñado en este trabajo es muy fácil de instalar y de mantener, pues tiene un diseño simple y fuerte.

Cuba es un país que no cuenta con amplios recursos económicos ni geológicos (carbón mineral o hidrocarburos), pero si ha sido beneficiada geográficamente con la cantidad de radiación solar que recibe. Por ende cada investigación o innovación tecnológica referente a la utilización del recurso solar y al ahorro económico en su implementación significa un ahorro en concepto de importaciones de crudo y al final de dinero puesto que cada MW de energía solar FV instalado genera en su vida útil unos 38750 MWh lo que se traduce a unos 2.5 millones de USD ahorrados(Figueredo, 2010).

Lo anteriormente planteado sugiere que la solución fotovoltaica no es tan utópica, y si a ello le sumamos que por cada MW instalado también se deja de emitir a la atmósfera unas 127 875 toneladas de CO_2 en su vida útil y que el cambio climático es una realidad eminente (Figueredo, 2010). Entonces nos damos cuenta que esta es una solución inteligente y a la vez saludable para el medio ambiente.

3.7 Consideraciones finales del capítulo

- Los modelos desarrollados, de los principales elementos del módulo fotovoltaico permiten que en cada caso y momento específico pueda ser determinado los puntos de operación óptimos del sistema.
- El control de la posición usando la estrategia desarrollada de cálculo de la posición en cada instante, arrojó excelentes resultados. Haciendo que el mecanismo siga al sol con un error casi imperceptible.
- Este algoritmo pudo ser implementado sin dificultad en el controlador Arduino y por las pruebas realizadas en la maqueta se espera que interactúe sin problema con el hardware seleccionado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El país cumple con las metas trazada en el objetivo 247 de los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución, mediante la instalación de paneles fotovoltaicos tanto en redes como aisladas. Pero en ningún caso con control de posición, lo que conllevaría a una mayor eficiencia. Motivo por el que se realizó este trabajo, en la que se diseñó e implementó el algoritmo de control de la posición del módulo fotovoltaico, además se analizaron las diferentes estrategias de control del punto de operación del módulo, para lo cual se modelaron los principales elementos del sistema. Arrojando estos resultados y la investigación precedente, las siguientes conclusiones generales:

- Los sistemas fotovoltaicos fueron seleccionados teniendo en cuenta las necesidades reales actuales y previsiones de las futuras demandas. Por lo cual estos deben funcionar óptimamente durante su período de vida útil.
- Con los modelos desarrollados y los algoritmos analizados se logra que los controladores mantengan trabajando al sistema en su punto óptimo, sin importar que ocurran variaciones considerables tanto en las condiciones meteorológicas como en la demanda de la carga.
- A través del estudio de la literatura especializada con respecto al control de posición de módulos fotovoltaicos se estableció que de las variantes de control de posición existentes, la de dos ejes con control mediante el algoritmo de programación astronómica es la más idónea. Pues ésta incrementa la eficiencia y es inmune a cambios atmosféricos .

- El control de la posición por dos ejes utilizando una plataforma Arduino se implementó con pleno éxito a partir de introducir los datos de latitud y longitud del lugar, día del año y hora.
- Teniendo en cuenta el incremento de la eficiencia de los paneles, con el seguimiento automatizado y el bajo costo de su implementación, se justifica incluir el control por los dos ejes con programación astronómica sobre todo en paneles aislados.

Mediante las conclusiones anteriores se demuestra que se cumplieron los objetivos del trabajo. Además se justifica plenamente la necesidad de la anterior investigación, quedando demostrada la hipótesis inicialmente establecida.

Recomendaciones

En vista de continuar con las investigaciones y desarrollo de la energía solar fotovoltaica se recomienda lo siguiente:

- 1 Que se realice el montaje de un panel fotovoltaico con control de posición con el objetivo de comprobar su eficiencia.
- 2 Continuar los estudios de la aplicación de energía fotovoltaica y la optimización de la captación, aplicando nuevas estrategias de control al seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A GEORGIEV, A. R., P OLIVARES, 2004. Sun following system adjustment at the UTFSM. *Energy Conversion and Management*, 45, 1795-1806.
- AKHMEDYAROV, K. 1986. Economic efficiency of the FV-500 solar photoelectric station with automatic tracking of the sun. *APPL. SOLAR ENERGY.*, 22, 44-47.
- ARDUINO 2014. Manual de Arduino, programación y conceptos. *Arduino UNO*. zonamaker.
- ARQHYS 12-2012. La carta solar. *ARQHYS.com*.
- BADESCU, V. 2008. Theoretical derivation of heliostat tracking errors distribution. *solar energy*, 82, 1192-1197.
- BORTOLOTTI, M., FONTENLA, FERNANDO, KOFMAN, ERNESTO, ROMERO, MÓNICA 2007. Librería de Simulación por Eventos Discretos de Fuentes Conmutadas.
- CARDOZO, D. I. K. & JARA, E. A. M. 2014. Automatización de Panel Solar. *FPUNE Scientific*, 5.
- CUBADEBATE. 20-1-2017. *Cuba incorporará 59 parques fotovoltaicos* [Online]. La Habana Cuba: UCI. Available: <http://www.cubadebate.cu/noticias/2017/01/20/cuba-incorporara-59-parques-fotovoltaicos/> [Accessed 29-3 2017].
- ELECTRÓNICOS, E. D. C. 2014. Energía solar. In: (CCE), E. D. C. E. (ed.) *DSM 180 (23)-C*. Pinar del Río-Cuba.
- ENSLIN, J. 1992. Maximum power point tracking: A cost saving necessity in solar energy systems. *Renewable energy*, 2, 543-549.
- FEMIA, N., PETRONE, G., SPAGNUOLO, G. & VITELLI, M. Increasing the efficiency of P&O MPPT by converter dynamic matching. *Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on*, 2004. IEEE, 1017-1021.
- FIGUEREDO, C. M. 2010. Cuba hacia 100% con energías renovables.
- FUENTEVILLA, J. S., ÁVALOS, M. J. L. B. & GARCÍA, D. A. A. 2012. Diseño y construcción de un sistema de seguimiento fotovoltaico. *Universidad Tecnológica de la Mixteca*.

- HUSSEIN, K., MUTA, I., HOSHINO, T. & OSAKADA, M. 1995. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 142, 59-64.
- KHALIFA, A.-J. N. & AL-MUTAWALLI, S. S. 1998. Effect of two-axis sun tracking on the performance of compound parabolic concentrators. *Energy Conversion and Management*, 39, 1073-1079.
- LEE, C.-Y., CHOU, P.-C., CHIANG, C.-M. & LIN, C.-F. 2009. Sun tracking systems: a review. *Sensors*, 9, 3875-3890.
- LORENTZ 2014. Bomba sumergible sistema 4” con alimentación solar, con unidad de bomba de hélice excéntrica (HR) o centrífuga (C). In: LORENTZ (ed.) *PS 1200 HR/C*. Alemania.
- MCFEE, R. 1975. Power collection reduction by mirror surface nonflatness and tracking error for a central receiver solar power system. *Applied optics*, 14, 1493-1502.
- MOLINA, M., MERCADO, P. & WIERNES, P. 2007. Analisis y simulación de algoritmos de control para el seguimiento del punto de máxima potencia de sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Argentina*, 11.
- NAVEEN, M. A. A. B. Y. A. S. 12-2016. A Novel Scheme For Dynamically Tracking Solar Panel. ”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 29-35.
- SALAZAR, A. 2015. Diseño de un Sistema Fotovoltaico con control de posicionamiento *Universidad Politécnica Salesiana Guayaquil*.
- SAMLEX 2017. Catálogo de Productos de Conversión de Energía 2017. In: SALMEX (ed.) *SOLSUM 6.6F*. Canda.
- SCHNEIDER 2015. REGULADORES SCHNEIDER XANTREX MODELOS C35, C40 Y C60. In: SCHNEIDER (ed.) *XANTREX C35*. Alemania.
- SEMMA, R. & IMAMURA, M. Sun tracking controller for multi-kW photovoltaic concentrator system. Photovoltaic Solar Energy Conference, 1981. Springer, 375-380.
- TOVAR, E. V. G. 2016. Propuesta de Diseño de un Seguidor Solar de Dos y Tres Ejes. *ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo*, 1.
- YAGUACHI, L. & ARMANDO, F. 2015. *Diseño y desarrollo de un sistema de posicionamiento automático seguidor de la luz solar de un eje, controlado por medio de un microcontrolador y un motor paso a paso como actuador, empleando un control con lógica difusa*.
- YAKUP, M. A. B. H. M. & MALIK, A. 2001. Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam. *Renewable Energy*, 24, 223-234.

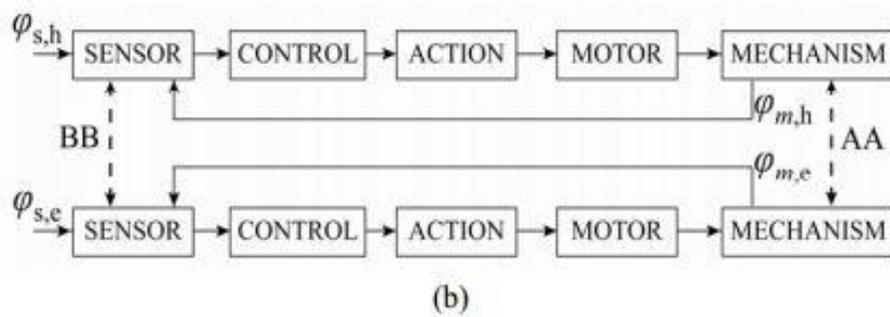
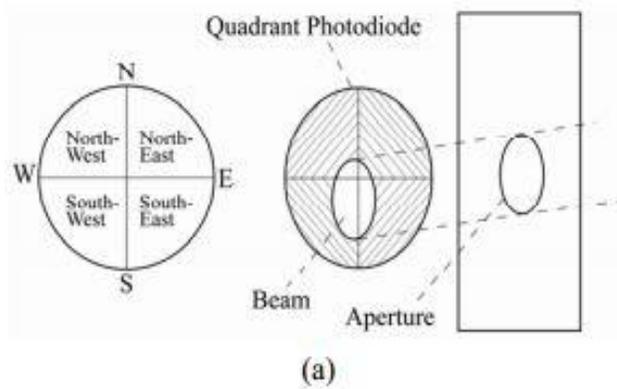
ANEXOS

Anexo I Evolución de los sistemas de seguimiento solar

	Algoritmos	Error	Ganancias en producción de energía comparada con sistemas si seguimiento solar
Lazo cerrado	Akhmedyarov et al. (1986)	-	40%
	Maish (1990)	1°	-
	Enslin (1992)	-	10-15%
	Brown et al. (1993)	< 0.01°	-
	Kalogirou (1996)	0.05-0.2°	-
	Khalifa et al. (1998)	-	75%
	Falbel et al. (2002)	0.05°	-
	Al-Mohamad (2004)	-	20%
	Abdallah (2004)	-	15-44%
	Aiuchi et al. (2004)	0.1°	-
Lazo abierto	McFee (1975)	0.5-1°	-

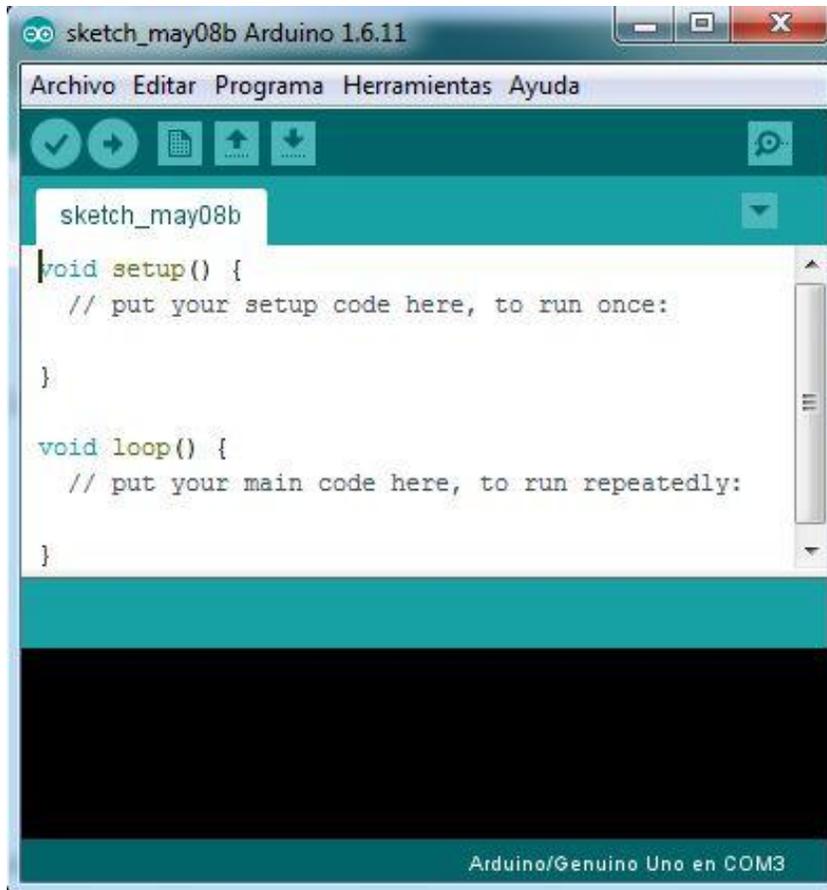
	Blanco-Muriel et al. (2001)	0.08°	-
	Abdallah et al. (2004)	-	41%
	Reda et al. (2004)	0.0003°	-
	Chen F. et al. (2006)	0.02°	-
	Chen F. et al. (2007)	0.2°	-
	Grena (2008)	0.0027°	-
	Chong et al. (2009)	-	-

Anexo II Esquema de funcionamiento y lazo de control de seguidor solar por luminosidad

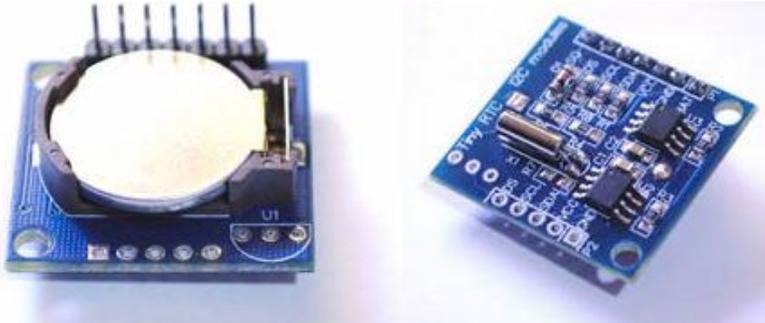


Anexo III Características de la plataforma de desarrollo Arduino UNO

Microcontrolador	ATmega 328
Voltaje (recomendado)	7-12V
Digital E/S	14 (6 salidas PWM)
Entradas analógicas	6
Corriente por I/O	40 mA
Memoria Flash	32 kB con 2 kB para el bootloader
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Velocidad de reloj	16 MHz

Anexo IV Interfaz de programación para la plataforma Arduino

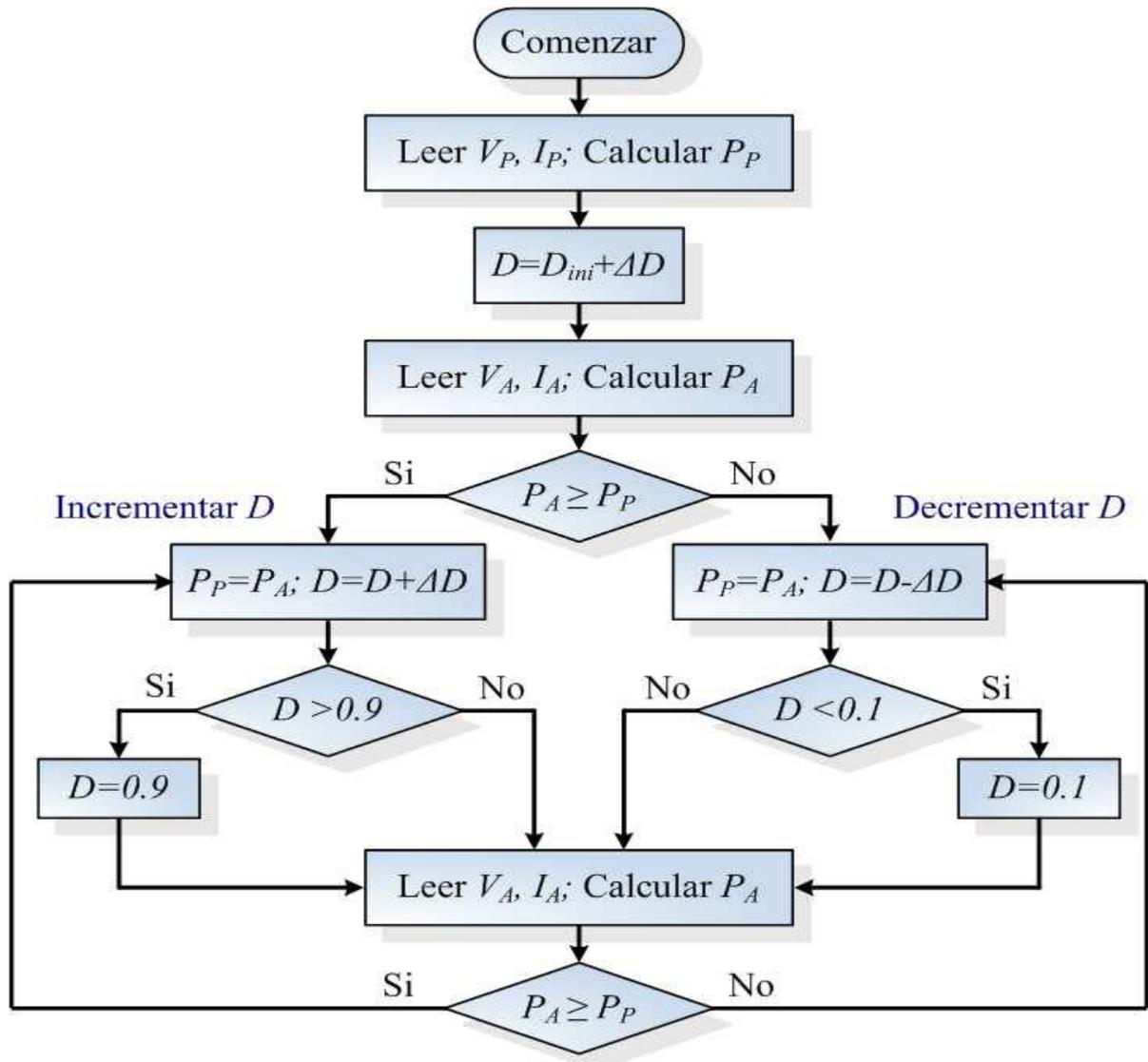
Anexo V Reloj de tiempo real RTC DS 1307



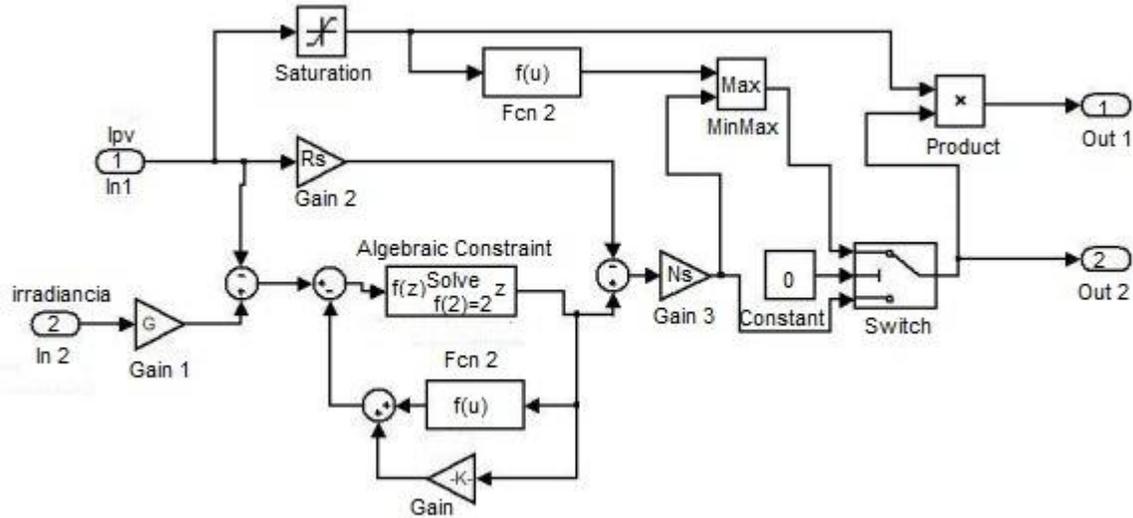
Anexo VI Datos de chapa del motor paso modelo 85BYGH45C-12

Angulo de paso	Long. del motor mm	Volt.Nom	Corr.Nom	Res	Induc	Mom.	Inercia	Peso
1.8	151	5.7 v	3A	1.9 Ω	22mH	9.3Nm	3.6kg-cm ²	3.7 kg

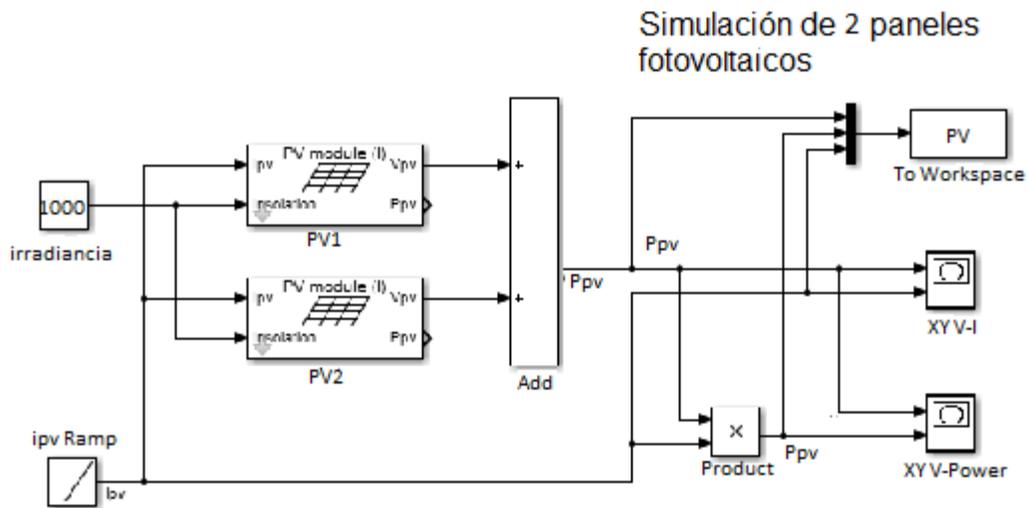
Anexo VII Diagrama de flujo del algoritmo P&O



Anexo IX Diagrama de simulación en Simulink de un panel fotovoltaico



Anexo X Diagrama de simulación en Simulink de una asociación de 2 paneles fotovoltaicos




```
unsigned long tiempo = 0;

boolean pulsadorM = LOW, pulsadorSV = LOW, banderaPuestacero = HIGH,
finCarreraAz = LOW, finCarreraAl = LOW, banderAltura = LOW, banderAzimut = LOW,
banderaModo = LOW;

uint8_t second = 30, minute = 1, hour = 1, wday, day = 1, month = 1, year = 17;

const int latchPin = 4; // Pin conectado al Pin 12 del 74HC595 (Latch)
const int dataPin = 5; // Pin conectado al Pin 14 del 74HC595 (Data)
const int clockPin = 6; // Pin conectado al Pin 11 del 74HC595 (Clock)

const byte numeros[17] = {
    0b11111100, 0b01100000, 0b11011010, 0b11110010, 0b01100110, 0b10110110,
    0b10111110, 0b11100000, 0b11111110, 0b11100110, 0b00000010, 0b11101100,
    0b01111010, 0b01101110, 0b01000000, 0b11001110, 0b00000000};

    Stepper myStepper(stepsPorRevolucion, 10, 11, 4, 13);

// inicializando la libreria stepper para los pines del 10 al 13

void setup () {
    while (!Serial);

    Serial.begin(57600);

    if (! rtc.begin()) {
        Serial.println("Couldn't find RTC");
        while (1);
    }

    rtc.adjust(DateTime(2017, 5, 11, 15, 50, 0));

    if (! rtc.isrunning()) {
        Serial.println("RTC is NOT running!");
    }
}
```

```
}  
  
pinMode(motAltura, OUTPUT);  
pinMode(motAzimut, OUTPUT);  
pinMode(latchPin, OUTPUT);  
pinMode(clockPin, OUTPUT);  
pinMode(dataPin, OUTPUT);  
pinMode(lcd0, OUTPUT);  
pinMode(lcd1, OUTPUT);  
pinMode(pulsadorMode, INPUT);  
pinMode(pulsadorSetValue, INPUT);  
myStepper.setSpeed(10); // fijando las rpm a 10  
}  
  
void loop () {  
    DateTime now = rtc.now();  
    if(banderaPuestacero == HIGH)  
    {  
        puestaCero();  
    }  
    digitalWrite(lcd0, LOW);  
    digitalWrite(lcd1, LOW);  
    pulsadorM = digitalRead(pulsadorMode);  
    if (pulsadorM == HIGH)  
    {
```

```
setMode();

}

if((now.minute() % 4) != 0)

{

banderAzimut = LOW;

banderAltura = LOW;

Serial.print("bandera");

}

if((now.minute() % 4) == 0 && now.hour() >= 8 && now.hour() <= 18 && banderAltura

== LOW && altura > 0)

{

Serial.print("altura");

motorAltura();

digitalWrite(motAltura, LOW);

banderAltura = HIGH;

}

if((now.minute() % 4) == 0 && now.hour() >= 8 && now.hour() <= 18 &&

banderAzimut == LOW && altura > 0)

{

motorAzimut();

digitalWrite(motAzimut, LOW);

banderAzimut = HIGH;

}

if(now.hour() == 18)
```

```
{
    retrocederAzimut();
}
} // fin lazo principal
void puestaCero()
{
    DateTime now = rtc.now();
    pinMode(finCarreraAltura, INPUT);
    pinMode(finCarreraAzimut, INPUT);
    digitalWrite(motAltura, HIGH);
    displayBCD(15, modo);
    do
    {
        digitalWrite(motAltura, HIGH);
        myStepper.step(- 1);
        finCarreraAl = digitalRead(finCarreraAltura);
    }while (finCarreraAl == 0);
    if(now.hour() == 1 && now.minute() == 1 && now.second() == 30)
    {
        banderaModo = LOW;
    do
    {
        buzzer();
```

```
    setMode();

    delay(1000);

    }while(banderaModo == LOW);

}

calcularAltura();

if(now.hour() >= 8 && now.hour() <= 18 && altura > 0)

{

    for(i=0; i= ((altura-alturAnterior) /0.2); i++)

        // el mecanismo tiene una resolucion de 0,2° por paso

        {

            myStepper.step(1);

        }

}

alturAnterior = altura;

digitalWrite(motAltura, LOW);

digitalWrite(motAzimut, HIGH);

do

{

    digitalWrite(motAzimut, HIGH);

    myStepper.step(- 1);

    finCarreraAz = digitalRead(finCarreraAzimut);

}while (finCarreraAz == 0);
```

```
if(now.hour() >= 8 && now.hour() <= 18 && altura > 0)
{
    calcularAzimut();
    for(i=0; i= ((azimut-azimutAnterior - 60)/0.2); i++)
    {
        myStepper.step(1);
    }
    azimutAnterior = azimut;
}
digitalWrite(motAzimut, LOW);
banderaPuestacero = LOW;
delay(1000);
displayBCD(16, modo); // apagar disple
}
```

```
void motorAltura()
{
    digitalWrite(motAltura, HIGH);
    calcularParametros();
    calcularAltura();
    for(i=0; i= ((altura - alturAnterior)/0.2); i++)
    {
        myStepper.step(1);
    }
}
```

```
    }  
    alturAnterior = altura;  
}  
void motorAzimut()  
{  
    digitalWrite(motAzimut, HIGH);  
    calcularParametros();  
    calcularAltura();  
    calcularAzimut();  
    for(i=0; i=((azimut -azimutAnterior)/0.2); i++)  
    {  
        myStepper.step(1);  
        cont++; // cuenta la cantidad de grados que ha caminado el panel  
    }  
    azimutAnterior = azimut;  
}  
void retrocederAzimut()  
{  
    myStepper.step(- cont);  
    cont = 0;  
}  
void calcularParametros()  
{
```

```
DateTime now = rtc.now();

N = 0;

if (now.month() > 1)

{

    int i = 0;

    do{

        N = N + meses[i];

        i++;

    }while(i < (now.month()-1));

}

hr = now.hour()*60 +now.minute();

N = N + now.day();

angDeclinacion = 23.45 * (sin(( 360 * (284 + N)/365)*3.14/180)); // cálculo del ángulo de
declinación

b1 = (N - 81)*0.99;

E = 9.87 * (sin(2* b1*3.14/180))- 7.53 * (cos (b1*3.14/180)) - 1.5 * (sin(b1*3.14/180));//
* 180 /3.14 rad a grados

horaSolar = (hr+E)/60 + (2.8 * (Lref - Lloc)*24/360); // cálculo de la hora solar

W = (-15 * horaSolar + 180); // cálculo del ángulo horario

}

void calcularAltura()

{

    altura = (asin(cos(Latitud*3.14/180) * cos(angDeclinacion*3.14/180) * cos(W*3.14/180)
+ (sin(Latitud*3.14/180) * sin(angDeclinacion*3.14/180)))*180/3.14 );
```

```
}  
  
void calcularAzimut()  
  
{  
  
  if(cos (W*3.14/180) < (tan (angDeclinacion*3.14/180) / tan (Latitud*3.14/180)))  
  
    {  
  
      azimut = (asin ((cos (angDeclinacion*3.14/180) * sin(W*3.14/180)) / cos  
(altura*3.14/180))*180/3.14);  
  
    }  
  
    else if(cos (W*3.14/180) > (tan (angDeclinacion*3.14/180) / tan (Latitud*3.14/180)))  
  
      {  
  
        azimut = 180 - (asin ((cos (angDeclinacion*3.14/180) * sin(W*3.14/180)) / cos  
(altura*3.14/180))*180/3.14);  
  
      }  
  
    if(azimut < 0)  
  
      {  
  
        azimut = 360 + azimut;  
  
      }  
  
    }  
  
void buzzer();//Función para sonido de retroalimentación del botón  
  
{  
  
  int volume = 10; // máximo volume es 255  
  
  int PW = 1432;  
  
  for (i = 0; i < 150; i++)  
  
    {
```

```
analogWrite(speakerOut, volume);

delayMicroseconds(PW); // espera el valor de PW

analogWrite(speakerOut, 0);

}

}

void setMode()

{

pulsadorM = digitalRead(pulsadorMode);

if (pulsadorM == HIGH)

{

tiempo = millis() + 3000;

buzzer();

do

{

pulsadorM = digitalRead(pulsadorMode);

if (tiempo >= millis() && pulsadorM == HIGH ) // si estuvo el botón de modo pulsado
3s, entrar al menú

{

modo = 1; // bandera de estado modo

displayBCD(a, modo);

digitalWrite(lcd0, LOW); // display

digitalWrite(lcd1, HIGH);

delay(10);

digitalWrite(lcd0, HIGH);
```

```
digitalWrite(lcd1, LOW);
delay(10);
}
} while (tiempo >= millis() && pulsadorM == HIGH);
}
if (modo == 1 && tiempo < millis()) // estuvo tres segundos el botón de modo presionado
{
digitalWrite(lcd0, LOW);
digitalWrite(lcd1, LOW);
tiempo = millis() + 3000;
do
{
pulsadorM = digitalRead(pulsadorMode);
if (pulsadorM == HIGH)
{
tiempo = millis() + 3000;
buzzer();
a++;
if (a > 14)
{
a = 11;
}
digitalWrite(lcd0, HIGH);
```

```
digitalWrite(lcd1, LOW);
displayBCD(a, modo);
delay(100);
pulsadorSV = digitalRead(pulsadorSetValue);
if (pulsadorSV == LOW)
{
    buzzer();
    setValue(a);
    modo = 1;
    tiempo = millis() + 3000;
}
}
} while (tiempo >= millis()); // si en 3s no se pulsa el botón sale del menú.
displayBCD(16, modo); // apagar display
a = 10;
modo = 1;
banderaModo = HIGH;
}
write_ds1307(); // Escribir hora y fecha al RTC
digitalWrite(lcd0, LOW);
digitalWrite(lcd1, LOW);
}
void setValue(int a)
```

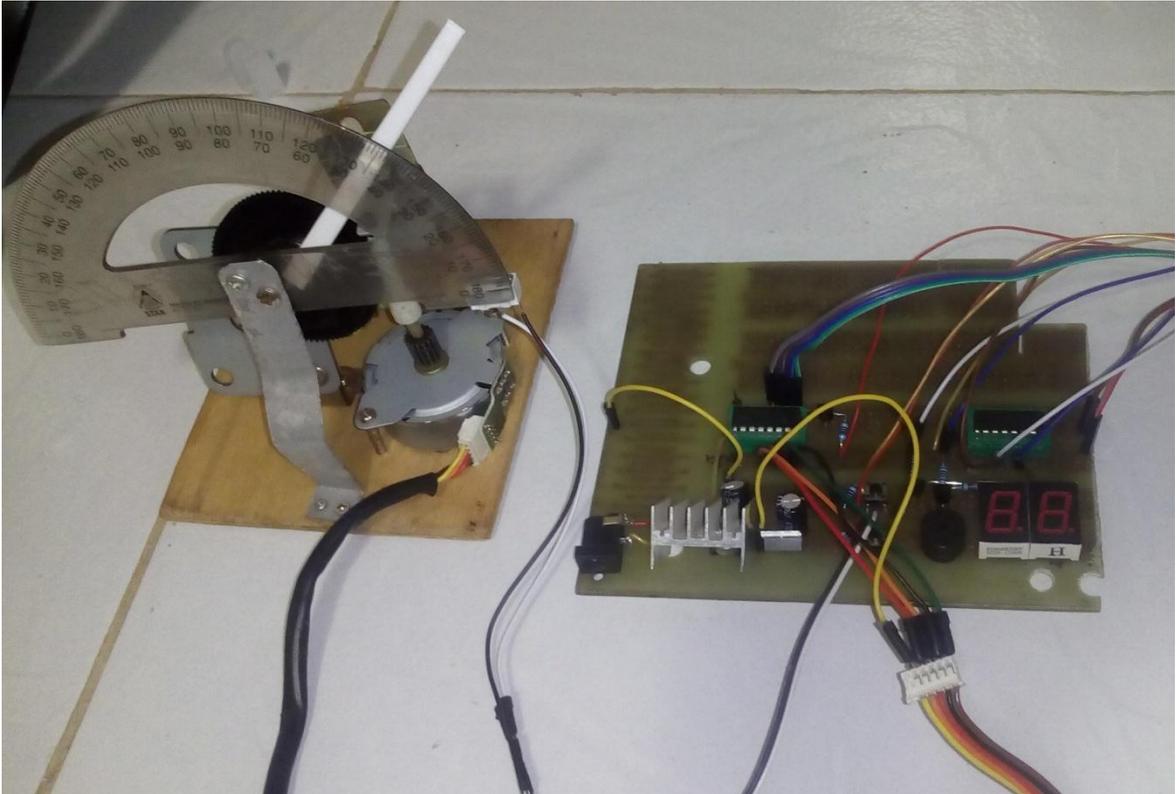
```
{
    tiempo = millis() + 2000; // tiempo disponible
    do
    {
        pulsadorSV = digitalRead(pulsadorSetValue);
        if (pulsadorSV == HIGH)
        {
            datos[a - 11]++;
            if(a == 11 && datos[a - 11] > 12 )
            {
                datos[a - 11] = 1;
            }
            if(a == 12 && datos[a - 11] > 30 )
            {
                datos[a - 11] = 1;
            }
            if(a == 13 && datos[a - 11] > 24 )
            {
                datos[a - 11] = 1;
            }
            if(a == 14 && datos[a - 11] > 60 )
            {
                datos[a - 11] = 1;
            }
            buzzer();
            modo = 0;
            tiempo = millis() + 2000; // se renueva el tiempo disponible
        }
        pulsadorM = digitalRead(pulsadorMode);
        if (pulsadorM == HIGH)
        {
```

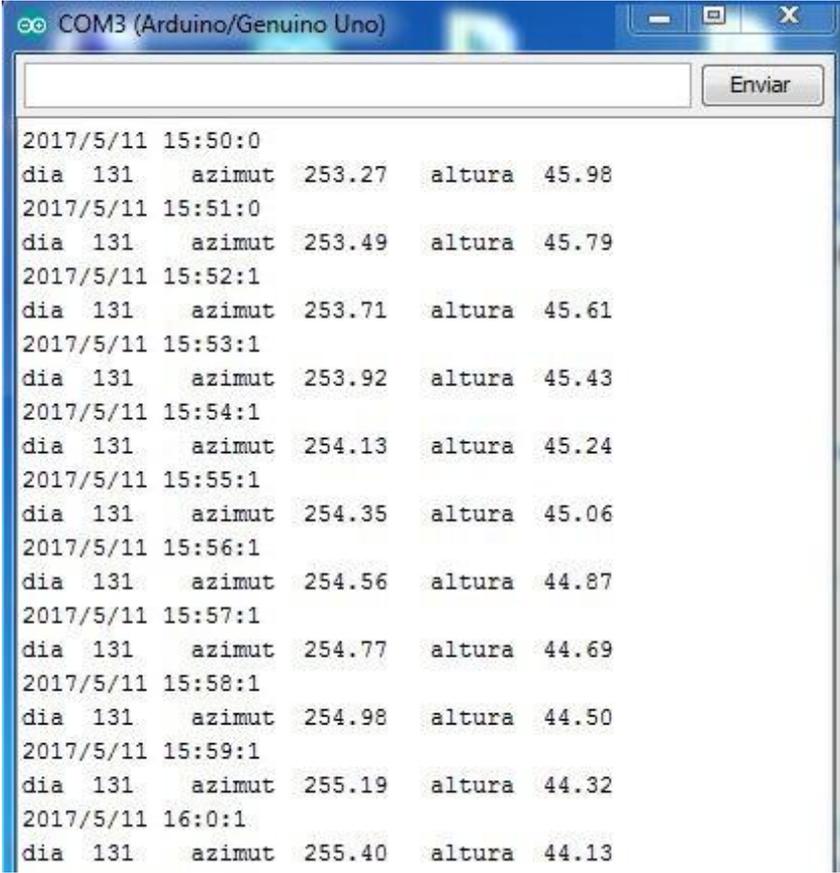
```
tiempo = millis();//-1000;
}
if (datos[a - 11] < 9 && modo == 0)
{   displayBCD(datos[a - 11], modo);   }
if (datos[a - 11] > 9 && modo == 0)
{
d = datos[a - 11] / 10;
u = datos[a - 11] % 10;
digitalWrite(lcd0, LOW);
digitalWrite(lcd1, HIGH);
digitalWrite(latchPin, LOW);
shiftOut(dataPin, clockPin, LSBFIRST, numeros[u]);
digitalWrite(latchPin, HIGH);
delay(5);
digitalWrite(lcd1, LOW);
digitalWrite(lcd0, HIGH);
digitalWrite(latchPin, LOW);
shiftOut(dataPin, clockPin, LSBFIRST, numeros[d]);
digitalWrite(latchPin, HIGH);
delay(5);
}
} while (tiempo >= millis()); // si en 2s no se pulsa el boton sale del menú.
digitalWrite(latchPin, LOW);
```

```
}  
  
bool write_ds1307()  
{  
    minute = datos[3];  
    hour = datos[2];  
    day = datos[1];  
    month = datos[0];  
  
    rtc.adjust(DateTime(year, datos[0], datos[1], datos[2], datos[3],second)); // Establece la  
    fecha y hora  
    return false;  
}  
  
void displayBCD(int a, int b) // si b es 0 esta en modo menú, si b es 1 esta en modo value  
{  
    if (b == 0)  
    {  
        digitalWrite(lcd0, LOW);  
        digitalWrite(lcd1, HIGH);  
        digitalWrite(latchPin, LOW);  
        shiftOut(dataPin, clockPin, LSBFIRST, numeros[a]);  
        digitalWrite(latchPin, HIGH);  
    }  
    else if (b == 1)  
    {  
        digitalWrite(lcd0, LOW);
```

```
digitalWrite(lcd1, HIGH);  
  
//delay(1000);  
  
digitalWrite(latchPin, LOW);  
  
shiftOut(dataPin, clockPin, LSBFIRST, numeros[a]);  
  
digitalWrite(latchPin, HIGH);  
  
}  
  
}
```

Anexo XIII Maqueta a escala del mecanismo de accionamiento



Anexo XIV Datos experimentales obtenidos del controlador Arduino

Time	dia	azimut	altura
2017/5/11 15:50:0	131	253.27	45.98
2017/5/11 15:51:0	131	253.49	45.79
2017/5/11 15:52:1	131	253.71	45.61
2017/5/11 15:53:1	131	253.92	45.43
2017/5/11 15:54:1	131	254.13	45.24
2017/5/11 15:55:1	131	254.35	45.06
2017/5/11 15:56:1	131	254.56	44.87
2017/5/11 15:57:1	131	254.77	44.69
2017/5/11 15:58:1	131	254.98	44.50
2017/5/11 15:59:1	131	255.19	44.32
2017/5/11 16:0:1	131	255.40	44.13

Anexo XV Dinámica del mecanismo de seguimiento solar