

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica

**Automatización de un módulo fotovoltaico rotatorio de un eje con
disponibilidad de datos de manera remota**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Kenneth Andrei González Nájera

201138763

Cartago

3 de diciembre de 2017

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado **Automatización de un módulo fotovoltaico rotatorio de un eje con disponibilidad de datos de manera remota**, realizado por el señor **Kenneth Andrei González Nájera** y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



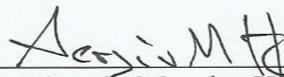
Ing. Carlos Meza Benavides

Profesor lector



Ing. Hugo Sánchez Ortíz

Profesor lector



Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor asesor

Cartago, 1 de diciembre 2017

Declaratoria de Autenticidad

Declaro que el presente documento llamado Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, he utilizado y aplicado literatura relacionada al tema así como la utilización de conocimientos propios. En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Kenneth Andrei González Nájera

Cartago, 28 de noviembre de 2017

Cédula: 3-0474-0068

Resumen

El presente documento, muestra el diseño e implementación de la parte electrónica de un seguidor solar de un eje con disponibilidad de datos de forma remota. Así comparar cuanta más potencia se genera a partir de un sistema que sigue la trayectoria del Sol vs una estructura colocada de manera fija con 0° de inclinación, es decir, colocada de manera horizontal. Se utilizan diferentes fórmulas que describen los diferentes ángulos para determinar la posición relativa del Sol a lo largo del día durante todo el año, también fue necesario el diseño e implementación de un sistema de control automático, brindando un mejor desempeño a la planta. Otro aspecto fundamental, es la transmisión de algunos datos como la potencia producida por ambas estructuras, así como, el ángulo de inclinación del seguidor. Teniendo acceso a los mismos desde dispositivos remotos.

Palabras clave: Energía, Fotovoltaica, Control, Automático, Geometría, Solar, Comunicación, Remota.

Abstract

The present document shows the design and implementation of the electronic part of a solar tracker of one axis with data availability remotely. To compare how much more power is generated from a system that follows the trajectory of the sun vs. a fixedly placed structure with 0° of inclination. For which different formulas were used to describe the different angles to determine the location of the sun throughout the day throughout the year. It was also necessary to use an automatic control system to achieve a better plant performance. Another fundamental aspect is the transmission of some data such as power produced for both structures and the inclination angle of the sun tracker. To have access to them from remotely devices.

Keywords: Energy, Photovoltaic, Control, Automatic, Geometry, Solar, Communication, Remote.

Agradecimientos

Ante todo, dedico este trabajo a Dios que me ha dado salud y la capacidad de poder estudiar una ingeniería, luego a mi mamá y hermano quienes me han apoyado y han sido un ejemplo a seguir para desarrollarme como persona y profesional. Además, de la oportunidad que me dieron de estudiar tan prestigiosa carrera y siempre me brindaron los recursos necesarios para salir adelante.

También agradezco al Dr. Ing. Carlos Meza Benavides, por depositar su confianza en mi persona y abrir las puertas del SESLab para desarrollar el presente proyecto, así como sus aportes brindados durante el desarrollo del proyecto.

Por último, agradezco a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron a que este trabajo se realizara de la mejor manera.

Kenneth Andrei González Nájera

Cartago, 3 de diciembre de 2017

Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Lista de símbolos y abreviaciones	vi
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Restricciones	4
1.4 Supuestos del proyecto	5
1.5 Contribuciones de la tesis	5
1.6 Estructura	5
2 Geometría solar	6
3 Radiación e irradiancia solar	9
4 Sistemas fotovoltaicos y seguidores solares	14
4.0.1 Sistemas Fotovoltaicos	14
4.0.2 Micro Inversores	15
4.0.3 Seguidores Solares	16
5 Tipos de comunicación inalámbrica	18
5.0.1 Comunicación WiFi	18
5.0.2 Comunicación Bluetooth	19
6 Módulo fotovoltaico	20
7 Hardware	22
7.1 Microcontrolador	22
7.2 Acelerómetro	23
7.3 Puente H	25
8 Sistema de control	27
8.1 Modelo dinámico de un sistema	27
8.2 Diseño del Sistema de control	31

9 Circuito implementado	35
10 Resultados y análisis de la implementación del sistema	38
11 Conclusiones y recomendaciones	49
11.1 Conclusiones	49
11.2 Recomendaciones	50
Bibliografía	51
A CanadianSolar 250W	54
B Windy Nation LIN-ACT1-XX Linear Actuators	56

Índice de figuras

2.1	Geometría solar.[1]	6
2.2	Declinación solar.[2]	7
2.3	Perihelio y afelio.[3]	8
3.1	Radiación solar global diaria media mensual para el mes de enero.[4]	10
3.2	Radiación solar global diaria media mensual para el mes de julio.[4]	11
3.3	Radiación global horizontal promedio anual.[5]	11
3.4	Irradiancia solar para el día 310 del año sobre una superficie perpendicular a los rayos del Sol vs una colocada de forma horizontal.	13
4.1	Panel monocristalino vs panel policristalino.[6]	15
4.2	Conexión aislada de un sistema fotovoltaico.[7]	15
4.3	Diagrama de comunicación en un módulo PV.	16
4.4	Tipos de seguidores solares.[8]	17
5.1	Tipos de redes inalámbricas.[9]	18
6.1	Módulo fotovoltaico.	21
6.2	CDD y Microinversor.	21
7.1	Adafruit Feather M0 WiFi.[10]	22
7.2	Acelerómetro ADXL335.	23
7.3	Sensor colocado sobre el panel solar.	24
7.4	Sensor colocado debajo del panel solar.	24
7.5	Sensor colocado en la sombra.	24
7.6	Puente-H L293N.	25
7.7	Sentido de giro Puente-H L293N.	26
8.1	Sistema SISO.	27
8.2	Ángulo de salida sin media móvil (celeste) y ángulo de salida con media móvil (naranja) para una tensión de entrada de 10V.	28
8.3	Inclinación del panel en una trayectoria de Este a Oeste con 10V de alimentación.	29
8.4	Inclinación del panel en una trayectoria de Este a Oeste con 12V de alimentación.	29
8.5	Diagrama en Simulink.	30
8.6	Ángulo de salida utilizando la función de transferencia 8.3.	30
8.7	Ángulo de salida dado por el acelerómetro ADXL335.	30
8.8	Diagrama de bloques de la planta junto con el sistema de control en lazo cerrado.	31
8.9	Tipos de respuesta de los sistemas.[11]	33

9.1	Diagrama del circuito implementado	35
9.2	Circuito real implementado	36
9.3	Prototipo final	37
10.1	Potencia acumulada para el día 5 de Noviembre	38
10.2	Ángulo cenital teórico y ángulo de inclinación de la planta.	39
10.3	Ángulo teórico con tiempo de muestreo de 15 minutos.	40
10.4	Ángulo experimental con tiempo de muestreo de 15 minutos.	40
10.5	Ángulo teórico y experimental para el 17 de noviembre del 2017.	41
10.6	Potencia generada por la estructura con seguidor solar vs la estructura fija para el día 305 del 2017.	42
10.7	Potencia generada por la estructura con seguidor solar vs la estructura fija para el día 306 del 2017.	42
10.8	Potencia generada por la estructura con seguidor solar vs la estructura fija para el día 309 del 2017.	43
10.9	Potencia generada por la estructura con seguidor solar vs la estructura fija para el día 310 del 2017.	43

Índice de tablas

3.1 Radiación para diferentes días del año	13
7.1 Configuración de giro para el Puente-H L293N.	26
10.1 Potencia producida por cada módulo para el día 1 de Noviembre del 2017	44
10.2 Potencia producida por cada módulo para el día 2 de Noviembre del 2017	45
10.3 Potencia producida por cada módulo para el día 5 de Noviembre del 2017	46
10.4 Potencia producida por cada módulo para el día 6 de Noviembre del 2017	47
10.5 Potencia diaria acumulada	48
10.6 Energía diaria promedio	48

Lista de símbolos y abreviaciones

Abreviaciones

δ	Declinación solar
ϕ	Latitud
θ_z	Ángulo Cenital
AC	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
CDD	Concentrator Data Device
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
NOOA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PV	Fotovoltaico
RF	Radio Frecuencia
SESLab	Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad
SI	Sistema Internacional de Unidades
WRC	World Radiation Center

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

A través de los años ante el aumento de la temperatura a nivel global causado por los gases de efecto invernadero, los cuales son generados por la quema de combustibles fósiles entre otras fuentes de contaminación. Ha surgido la necesidad y ha despertado el interés de muchas personas y compañías en la utilización de fuentes de energía renovables, las cuales no generan este tipo de desechos, contribuyendo en gran medida a disminuir la contaminación del planeta y mejorando la salud de la población en general. Existen diversas fuentes de energías renovables, las cuales son inagotables y su uso reduce al mínimo la generación de residuos que contaminen el medio ambiente. Entre las más comunes están:

- Energía Eólica.
- Energía Hidroeléctrica.
- Energía Geotérmica.
- Energía Solar.

El presente proyecto está enfocado en la energía solar, la cual es producida por medio de la radiación del Sol, a través de la cual es posible generar calor y electricidad mediante el uso de celdas fotovoltaicas. Además, todos los años el Sol brinda unas 10000 mil veces más energía que la que el ser humano consume, por lo tanto, se puede decir que es una fuente inagotable y a la cual tienen acceso todas las personas.[12] La radiación que brinda el Sol en un determinado lugar de la Tierra depende de diversos factores, entre ellos: el día, el año, la hora, la latitud y otros factores ligados a las condiciones climáticas. Actualmente es una de las energías renovables más desarrolladas y usadas alrededor del mundo debido a la gran cantidad de beneficios que brinda. Algunas de sus ventajas son:

- Renovable y gratuita.
- No contaminante.
- Inagotable.
- Fácil acceso.
- Se puede aprovechar en zonas remotas.

La principal desventaja que presenta implementar sistemas fotovoltaicos, es la inversión inicial que es alta, ya que la mayoría de sistemas fotovoltaicos tienen un alto costo. Pero dicha inversión puede ser recuperada en un corto período de tiempo. También es importante mencionar que estos sistemas tienen períodos de vida útil de 20 a 25 años, sin embargo, luego de ese tiempo reducen su desempeño, pero su funcionamiento sigue.[13]

A partir de lo mencionado anteriormente surge la necesidad de aprovechar al máximo esta fuente de energía. Una manera sencilla de realizar lo mencionado anteriormente es el uso de estructuras de seguimiento solar. En el mercado actual, en especial en zonas como Costa Rica, la mayor parte de los módulos fotovoltaicos que se venden son módulos estáticos es decir, no tienen partes móviles. Esto busca reducir el costo de dichos sistemas, así como evitar el mantenimiento o remplazo de los sistemas mecánicos. Esto conlleva a que dichos módulos no aprovechen al 100% la energía solar, debido a que durante la mayor parte del día los rayos que inciden sobre su superficie no lo hacen de forma perpendicular.

Por lo tanto, se pretende desarrollar un seguidor solar de bajo costo y pocas partes móviles para determinar si es rentable implementar este tipo de tecnología en instalaciones fotovoltaicas y de esta manera aprovechar de una mejor forma la radiación del Sol, ya que durante el transcurso del día los rayos del sol van a incidir de forma perpendicular a la superficie de las celdas fotovoltaicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Desarrollar un sistema electrónico para un módulo fotovoltaico el cual cuenta con un sistema electromecánico para ajustar el ángulo de inclinación del mismo según la posición relativa del sol y evaluar su desempeño respecto a un módulo con inclinación fija a 0° , teniendo acceso a los datos de forma remota.
- **Indicador:** Variaciones en el ángulo de inclinación de 5° cada 25 minutos aproximadamente.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de control en lazo cerrado para ajustar el ángulo de inclinación del módulo fotovoltaico.
 - **Indicador:** Regulación en ángulos con variaciones de 1° y con un error de posición menor o igual al 1%.
- Generar las señales de consigna a partir de modelos matemáticos que correspondan con la posición relativa del Sol en una hora, día, mes y año determinado.
 - **Indicador:** Consigna con un error menor al 5% con respecto a la efeméride del Sol de una fuente confiable.
- Almacenar en un sistema de visualización remota información referente al desempeño del módulo con inclinación variable con respecto a otro con inclinación fija a 0° .
 - **Indicador:** El Sistema de visualización remoto permite ver los datos de producción de energía con un intervalo configurable de 15min, 30 min, 45 min y 60 min.
- Diseñar un sistema que permita evaluar el estado del sistema electromecánico del módulo fotovoltaico.
 - **Indicador:** Es posible conocer el ángulo de inclinación en tiempo real del sistema de forma remota. El sistema emite alarmas si existen divergencias mayores al 5% entre el ángulo de inclinación de consigna y el ángulo medido.

1.3 Restricciones

1. Para determinar la posición relativa del Sol es necesario utilizar un algoritmo matemático con el cual es posible determinar el ángulo cenital, evitando el uso de sensores.
2. Se debe utilizar una estructura monosoporte de un solo eje de rotación, la cual cuenta con un actuador lineal de la marca WindyNation con una extensión máxima de 30 pulgadas.
3. Para la transmisión de datos por medio de WiFi se utiliza el Adafruit Feather M0 WiFi.
4. Se debe utilizar un CDD (concentrator data device), por sus siglas en inglés, de la compañía Power-One Renewable Energy Solutions para monitorear los datos referentes a la potencia del panel.
5. Las mediciones deben ser realizadas en la granja de paneles solares, contiguo al antiguo SESLab, en el campus central del Tecnológico de Costa Rica.

1.4 Supuestos del proyecto

Para el desarrollo del proyecto *Automatización de un módulo fotovoltaico rotatorio de un eje con disponibilidad de datos de manera remota*, se consideran los siguientes supuestos.

1. Para simplificar los cálculos se asume que el lugar de trabajo ubicado en la ciudad de Cartago posee una latitud de 10° norte y una longitud de 84° oeste.
2. El sol tiene una trayectoria lineal de Este a Oeste.
3. Para los cálculos teóricos se asume un día completamente despejado, sin interferencia de otros fenómenos.
4. Se asume la salida del sol a las 7 am y su puesta a las 5 pm para simplificación de cálculos.

1.5 Contribuciones de la tesis

El presente proyecto tiene como fin contribuir a las investigaciones realizadas por el SESLab en el desarrollo de sistemas amigables con el medio ambiente. Su finalidad, es determinar la eficiencia de implementar en módulos PV partes móviles y sistemas electrónicos que le permitan seguir la trayectoria del Sol, aumentando la producción de potencia al aprovechar durante la mayor parte del día la radiación del sol. Además, brinda un monitoreo remoto de la producción energética de los diferentes módulos PV, con disposición de diferentes datos del sistema en tiempo real y de esta manera poder comparar la eficiencia de un seguidor solar respecto a módulos PV fijos.

1.6 Estructura

En los capítulos 2, 3, 4 y 5 se presentan los fundamentos teóricos para el desarrollo del proyecto. En los capítulos 6, 7, 8 y 9 se detalla el diseño e implementación del sistema electrónico. Finalmente, se presentan los resultados en el capítulo 10 y se finaliza el documento con las conclusiones y recomendaciones en el capítulo 11.

Capítulo 2

Geometría solar

Como se ha descubierto a lo largo de los años, el Sol cambia su posición respecto a una referencia según diferentes factores, algunos de ellos son la latitud, es decir la distancia que hay desde un punto determinado hasta el paralelo del Ecuador. [14] También influyen en su posición relativa, el día del año y la hora del día, ya que el Sol varía su posición en una trayectoria de este a oeste, en la cual cada día los rayos del Sol tienen un ángulo de incidencia diferente. En la Figura 2.1 se aprecian los diferentes ángulos que describen la geometría solar y que se utilizan para determinar la posición del Sol.

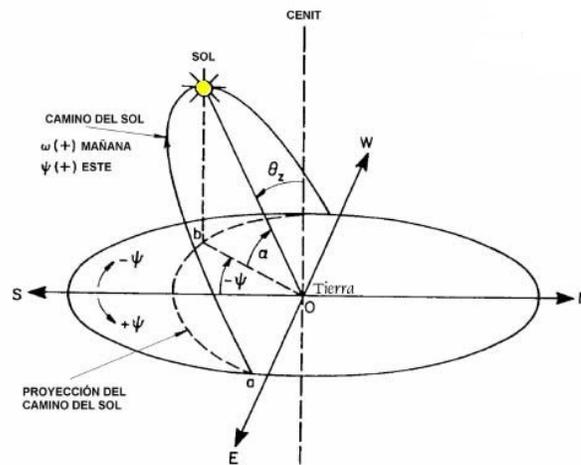


Figura 2.1: Geometría solar.[1]

El ángulo Cenital (θ_z), el cual es complementario a la altura solar se utilizará para determinar la posición del Sol a lo largo del año. Este ángulo está descrito por la fórmula 2.1 y toma valores de 0° a 90° a través del día.

$$\cos(\theta_z) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega) \quad (2.1)$$

Además, existe la declinación solar (δ), la cual varía debido a la inclinación de la Tierra sobre su eje de rotación y a la rotación de la Tierra alrededor del Sol, este ángulo es el que se forma desde el Ecuador y una línea trazada desde el centro de la Tierra al centro del Sol.[15] La declinación solar se describe en la fórmula 2.2

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left((284 + n) \frac{360}{365} \right) \quad (2.2)$$

En la cual n representa los días del año y toma valores de $n \in [1, 365]$. La figura 2.2 muestra la declinación solar de la Tierra, la cual varía de 23.45° a -23.45° .

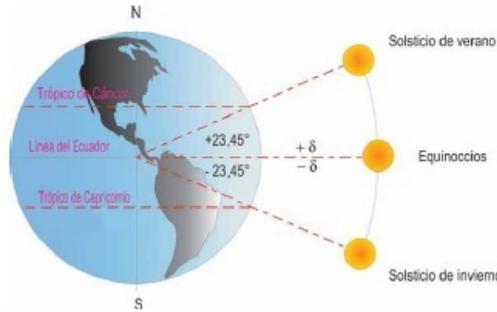


Figura 2.2: Declinación solar.[2]

Para la ecuación 2.1 ω representa el ángulo horario, dicho ángulo está comprendido entre el meridiano de un lugar determinado y el meridiano que es paralelo a los rayos del Sol. Este ángulo cambia conforme avanza el día. Una forma de aproximación sencilla es por medio de la siguiente expresión, en la cual $h \in [0, 23]$ y corresponde a la hora del día.

$$\omega = 180 - 15h \quad (2.3)$$

Nuevamente, para la ecuación 2.1, ϕ representa la latitud. Que para la ciudad de Cartago, Costa Rica toma un valor de 10° . Las fórmulas anteriores fueron tomadas de [16].

Otro factor a tomar en consideración es el movimiento que realiza la Tierra alrededor del Sol a lo largo del año, lo cual provoca que en enero (perihelio) el Sol esté más cerca de la misma y más lejos en julio (afelio).[4]

Para el perihelio el Sol se encuentra a una distancia de aproximadamente 147.5 millones de km mientras que para el afelio el Sol está a 152.6 millones de km de la Tierra. Este fenómeno se debe a que la trayectoria del planeta Tierra no es completamente circular, la Tierra está sometida a la acción de una fuerza gravitatoria ejercida por el Sol. Esta fuerza es la que origina que dicha trayectoria se deforme, puesto que origina una aceleración normal o centrípeta.[17] La figura 2.3 muestra la trayectoria de la Tierra, que como se mencionó anteriormente no es completamente circular, de ahí el motivo de que exista una época en la cual el Sol se encuentra más cerca de la Tierra y otra en la que se encuentre más alejado.

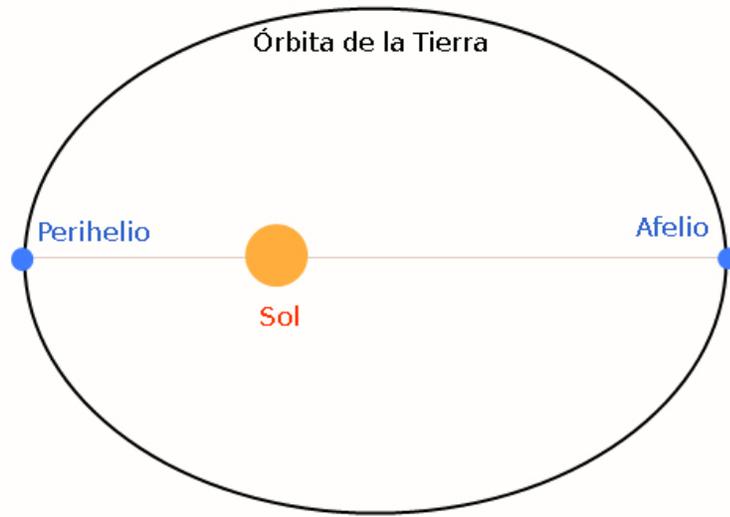


Figura 2.3: Perihelio y afelio.[3]

Capítulo 3

Radiación e irradiancia solar

El recurso solar es una de las fuentes de energía más importantes que abundan en el planeta Tierra ya que está disponible durante aproximadamente 12 horas al día en un hemisferio del planeta. Es una fuente a la cual todas las personas tienen acceso y se considera inagotable debido a la gran cantidad de radiación que produce a lo largo del año.

La actividad solar en la Tierra da origen a la gran mayoría de los recursos energéticos renovables, como por ejemplo:

- Energía solar térmica: Por medio de colectores solares se puede transmitir o almacenar calor, el cual puede ser utilizado de diferentes maneras.
- Energía solar fotovoltaica: la radiación solar provoca el efecto fotoeléctrico en cierto tipo de materiales, logrando transformar la radiación solar en electricidad.
- Eólica: el Sol calienta masas de aire lo cual ocasiona diferencia de temperatura entre ellas, originando corrientes de viento aprovechadas por las turbinas eólicas.
- Hidroeléctrica: el Sol calienta y evapora el agua en la superficie de los océanos y ríos. A medida que se eleva, el aire humedecido se enfría y el vapor se transforma en agua, dando lugar a la lluvia, la cual forma las corrientes de agua que permiten la generación de energía hidroeléctrica.
- Biomasa: las plantas con la ayuda del Sol y una mezcla de nutrientes, realizan la fotosíntesis aprovechando el CO_2 del ambiente y convirtiendo este en azúcares y oxígeno. [18]

El Sol emite energía en forma de ondas electromagnéticas que se desplazan a una velocidad en el vacío de 300.000 km/s. [19] Cuando los rayos inciden sobre un área específica estos pueden ser convertidos en energía y calor, esta energía es conocida como radiación solar la cual tiene unidades de $[J/m^2]$ o $[Wh/m^2]$, la radiación solar en un sitio específico se suele dar en un período de tiempo dado, normalmente, diario, mensual o anual. Mientras que por otra parte la potencia que se genera a partir de los rayos del Sol es conocida como irradiancia, esta es medida en $[W/m^2]$ según el SI.

La constante solar corresponde a la irradiancia procedente del Sol que incide de forma perpendicular sobre la superficie de la atmósfera terrestre. Se estima que este valor no es constante, debido a que depende de la distancia entre el Sol y la Tierra, la cual varía a lo largo del año. De acuerdo a distintas mediciones que se han realizado de la constante solar, se estima que su valor medio se

sitúa entre 1.338 y 1.368 [W/m^2]. Uno de los valores más utilizados es el obtenido por la NASA, el cual fue fijado en 1.353 [W/m^2]. Sin embargo, se han realizado mediciones más exactas como la del World Radiation Center y se ha estimado que este valor es 1.367 [W/m^2].[19]

Entre algunos de los factores que pueden afectar la radiación que llega a la superficie terrestre se pueden mencionar:

- La latitud y día del año.
- Tipo de superficie.
- Cantidad de nubes.
- Diversas condiciones atmosféricas.

Dentro de los factores mencionados anteriormente uno de los más importantes es la cantidad de nubes que existan en el cielo ya que entre mayor sea su espesor pueden llegar a reflejar un 70% de la radiación generada por el Sol. Las figuras 3.1 y 3.2 muestran lo mencionado anteriormente para el año 2006 en Costa Rica:

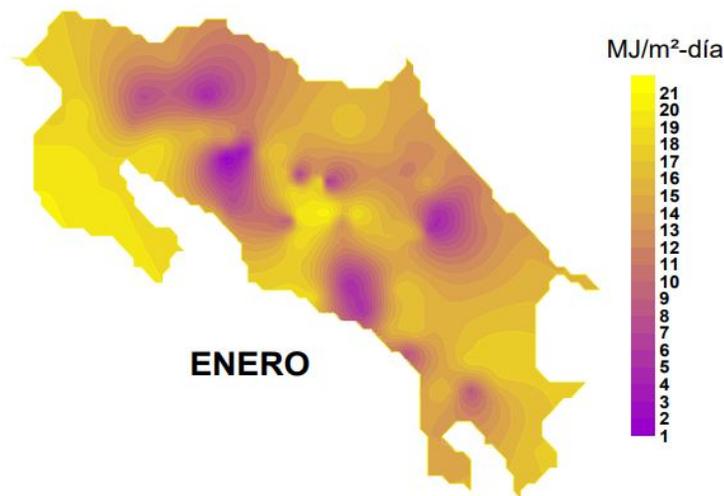


Figura 3.1: Radiación solar global diaria media mensual para el mes de enero.[4]

Como es posible apreciar en las figuras 3.1 y 3.2 la mayor parte del territorio nacional presenta condiciones óptimas para aprovechar el recurso solar a lo largo del año, incluso en meses donde el Sol se encuentra a la mayor distancia de la Tierra la radiación que incide sobre la superficie se encuentra en sus puntos máximos. Mientras que para el año 2013 se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 3.3. Nuevamente se aprecia que la mayor parte del territorio de Costa Rica provee una radiación de más de $1700 KWh/m^2$, incluso en zonas como Guanacaste y Puntarenas llegando a valores de $2100 KWh/m^2$ lo cual representa una alta radiación. Tornando el recurso solar uno de los más importantes en la zona.

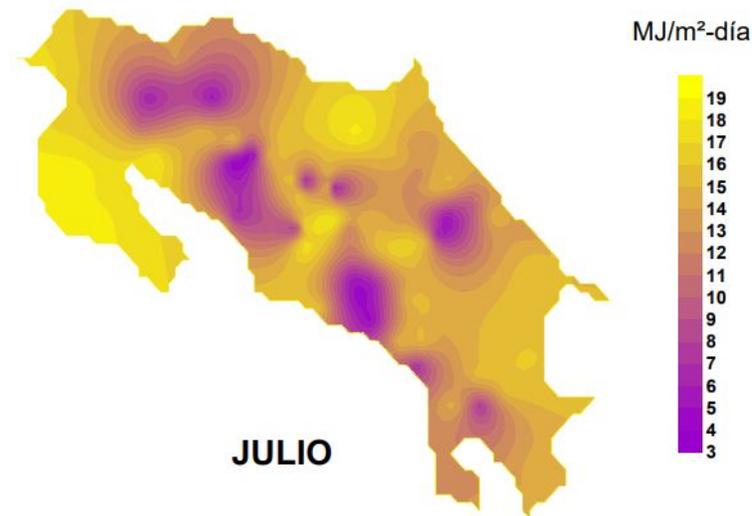


Figura 3.2: Radiación solar global diaria media mensual para el mes de julio.[4]

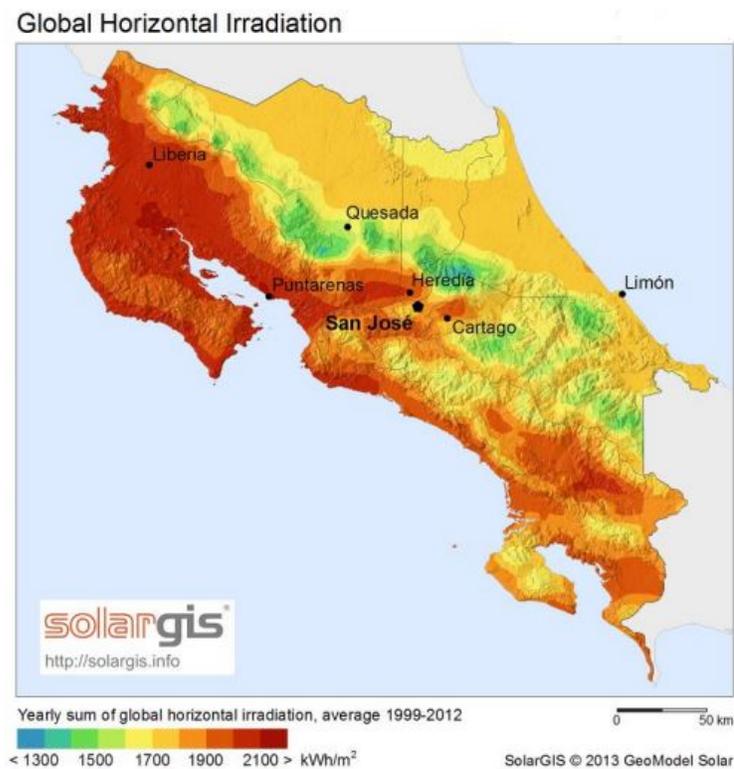


Figura 3.3: Radiación global horizontal promedio anual.[5]

Tomando los conceptos y fórmulas del capítulo 2 es posible determinar la radiación del Sol a partir de su irradiancia. La ecuación 3.1 corresponde al caso en el cual los rayos del Sol inciden de manera perpendicular a la superficie, mientras que la ecuación 3.2 representa el caso en el cual la superficie se encuentra colocada de manera horizontal. Es importante destacar que las fórmulas 3.1 y 3.2 corresponden a irradiancia, por lo tanto, es necesario realizar su integración para determinar la radiación.

$$S_{\perp} = S_M \left(1 - \frac{\alpha}{\cos(\theta_z)}\right) \quad (3.1)$$

$$S = S_M \left(1 - \frac{\alpha}{\cos(\theta_z)}\right) \cos(\theta_z) \quad (3.2)$$

En ambas fórmulas S_M y α están dados de acuerdo al sitio de estudio, S_M se encuentra relacionada con la intensidad cósmica y la retrodifusión, mientras que α se relaciona con el espesor de la atmósfera. Para este proyecto se determinó empíricamente que $S_M = 1140$ y $\alpha = 0.05$.

Haciendo una sustitución de variables como se muestra en 3.3 y 3.4 para simplificar la ecuación y después de realizar su integración se obtiene la radiación solar para una superficie perpendicular a los rayos del Sol.

$$A(n) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi) \quad (3.3)$$

$$B(n) = \text{cos}(\delta)\text{cos}(\phi) \quad (3.4)$$

$$Rad_{\perp} = 1140 \int \left(1 - \frac{0.05}{A(n) + B(n) \cos(180 - 15h)}\right) dh \quad (3.5)$$

$$Rad_{\perp} = 1140h - \frac{7.6 \tanh^{-1} \left(\frac{\tan\left(\frac{7.5(h-12)}{2}\right)}{\sqrt{B(n)^2 - A(n)^2}} \right) (A(n) - B(n))}{\sqrt{B(n)^2 - A(n)^2}} + C \quad (3.6)$$

Mientras que para la radiación para una superficie horizontal está dada por:

$$Rad = 1140 \int \left(1 - \frac{0.05}{A(n) + B(n) \cos(180 - 15h)}\right) (A(n) + B(n) \cos(180 - 15h)) dh \quad (3.7)$$

$$Rad = (1140A(n) + 57)h + 76B(n)\text{sen}(15(h - 12)) \quad (3.8)$$

El resultado obtenido será evaluado de 7 a 17, es decir, se asume que la salida del Sol será a las 7 am y que su puesta será a las 5 pm. Esto con el fin de simplificar el análisis debido a que antes y después de esas horas existen datos erróneos que no deben ser contemplados en el análisis, ya que las fórmulas dadas funcionan desde el momento en que sale el Sol hasta su puesta, mas no en otro período.

Como se muestra en la figura 3.4 la irradiancia del Sol es mayor sobre una superficie que se encuentra perpendicular a los rayos del Sol, mientras que para una superficie que se encuentra colocada de forma horizontal es menor.



Figura 3.4: Irradiancia solar para el día 310 del año sobre una superficie perpendicular a los rayos del Sol vs una colocada de forma horizontal.

Si se toma el día 310 y se calcula la radiación solar, es decir, el área bajo la curva se tiene que esta es $6.6041 [kWh/m^2]$ para una superficie fija, mientras que para una superficie perpendicular a los rayos es $10.5224 [kWh/m^2]$.

La tabla 3.1 muestra la radiación para diversos días a lo largo de año.

Radiación diaria [Wh/m^2]			
Día	Radiación para un seguidor	Radiación para superficie horizontal	Ganancia [%]
2	10600.17	7002.85	33.93
45	10540.81	6694.22	36.49
83	10593.36	6965.99	34.24
117	10673.63	7423.54	30.45
146	10731.03	7774.32	27.55
180	10514.19	6564.73	37.56
211	10470.87	6365.11	39.21
269	10479.73	6404.87	38.88
329	10777.77	7894.30	26.75
361	10777.38	7887.34	26.81

Tabla 3.1: Radiación para diferentes días del año

La cantidad de radiación extra que se obtiene con la implementación de un seguidor solar es aproximadamente 30% más que una superficie colocada de manera fija, esto de forma teórica. Para este cálculo se asumen días despejados en el cual la radiación del Sol incide sin ningún obstáculo a la superficie de la Tierra.

Capítulo 4

Sistemas fotovoltaicos y seguidores solares

4.0.1 Sistemas Fotovoltaicos

Los paneles PV corresponde a un tipo de tecnología que es capaz de generar potencia eléctrica a partir de semiconductores cuando estos son iluminados por un haz de fotones. Cuando la luz incide sobre las celdas PV estas generan la potencia eléctrica y cuando la luz desaparece la potencia también. [20]

Con el aumento en el uso de dicha tecnología existen diversos tipos de sistemas fotovoltaicos. Estos pueden ser clasificados de acuerdo a su fabricación o su forma de estar conectados a la red. Dentro de la clasificación por el tipo de fabricación se pueden encontrar en el mercado:

- Silicio puro monocristalino: Están basados en secciones de una barra de silicio cristalizado en una sola pieza.
- Silicio puro policristalino: Los materiales tienden a ser similares a los paneles de silicio puro monocristalino, aunque en esta ocasión el proceso de cristalización es diferente. Se basan en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado de forma desordenada en forma de pequeños cristales.
- Silicio amorfo: También son paneles basados en silicio, pero este material no sigue una estructura cristalina. Este tipo de paneles son empleados habitualmente para pequeños dispositivos electrónicos.[21]

Según su forma de estar conectados a la red pueden ser clasificados como:

- Sistemas Conectados a la Red (On Grid): Estos funcionan conectados a la red eléctrica de distribución, es decir utilizan la red eléctrica para alimentar los diferentes dispositivos.
- Sistemas Aislados (Off Grid): Funcionan en sitios aislados en donde no es posible utilizar la energía de la red eléctrica. Por lo tanto, son autónomos, es decir, la energía que es producida por la unidades es guardada en baterías y brinda alimentación al sistema.
- Sistemas Híbridos: Son una combinación de sistemas On Grid y sistemas Off Grid. Almacenan energía en baterías e inyectan excedentes a la red. [22]

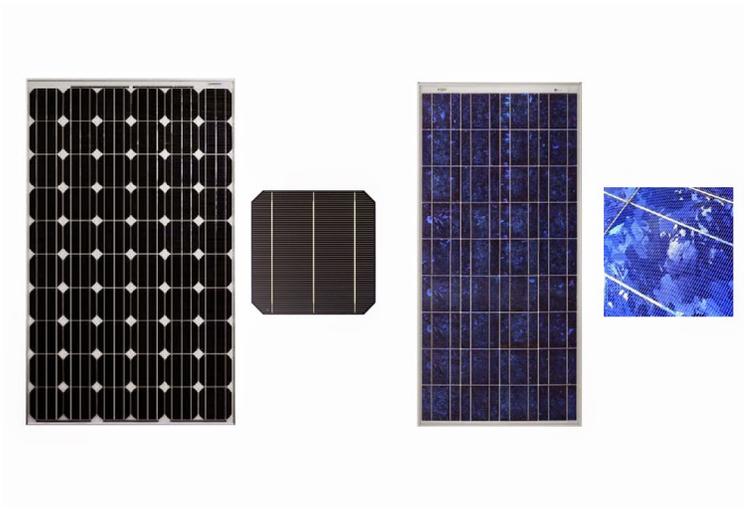


Figura 4.1: Panel monocristalino vs panel policristalino.[6]

Los componentes principales que componen un sistema fotovoltaico son el panel fotovoltaico y el micro inversor, y en el caso de los sistemas aislados, cuentan adicionalmente con un regulador de carga y baterías para almacenar la energía como se muestra en la figura 4.2.

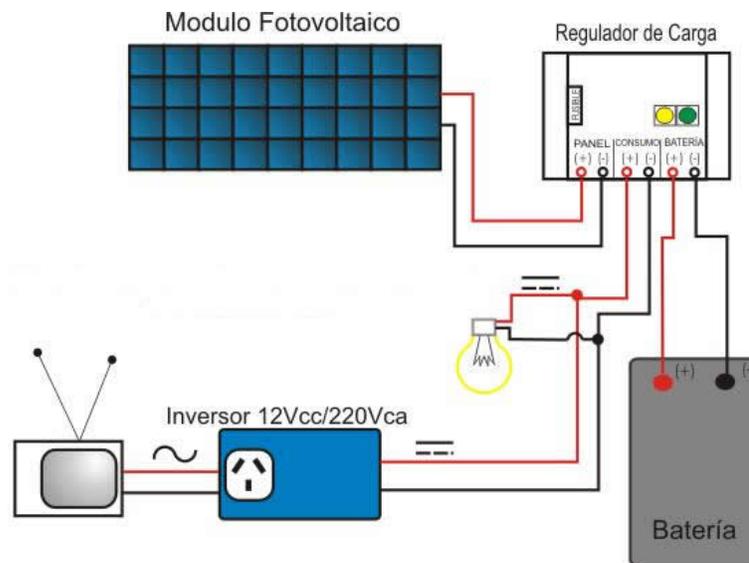


Figura 4.2: Conexión aislada de un sistema fotovoltaico.[7]

4.0.2 Micro Inversores

Los micro inversores representa un componente fundamental en las estaciones fotovoltaicas ya que tienen la función de convertir la corriente producida por el panel la cual es en DC, a corriente alterna, para luego ser distribuida a la red eléctrica en la cual pueden ser conectados gran cantidad de dispositivos que se utilizan en la industria o en los hogares. Para el proyecto se utiliza un micro inversor Aurora MICRO-0.25-I de la compañía Power-One actualmente ABB, con una capacidad de 255 Watt. Se utiliza dicho micro inversor ya que el SESLab cuenta con gran cantidad de estos módulos. Dicho dispositivo cuenta con la capacidad de comunicarse vía RF con un CDD y mediante un punto de acceso transmitir la información referente a la potencia producida por los módulos fotovoltaicos a la red.

La figura 4.3 brinda un esquema general del diagrama de comunicación entre el micro inversor y el CDD. El propósito de utilizar un CDD es eliminar el uso de sensores para monitorear la potencia de los sistemas PV, esto con el fin de disminuir los costos del proyecto al máximo, además, de utilizar los recursos con los que cuenta el SESLab. Una ventaja bastante importante es que el CDD es capaz de comunicarse aproximadamente con 30 micro inversores. Mediante el punto de acceso será posible consultar los datos de potencia generados por el sistema, para luego ser enviados a un dispositivo remoto junto con otros datos de interés.

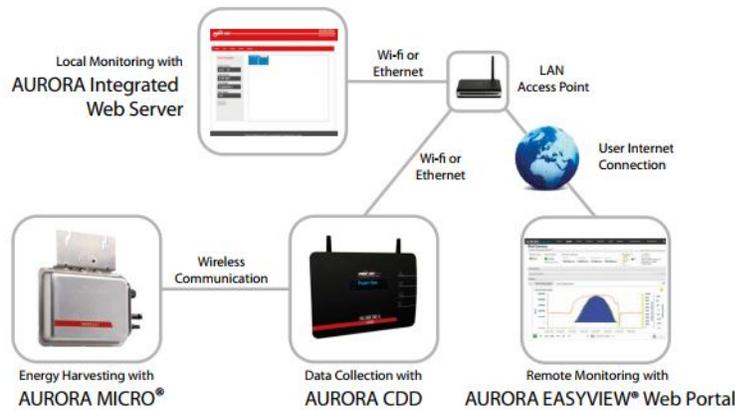


Figura 4.3: Diagrama de comunicación en un módulo PV.

4.0.3 Seguidores Solares

El uso de los seguidores solares cada vez es más común y frecuente en las plantas fotovoltaicas, ya que se ha comprobado las grandes ventajas que éstos brindan. Los seguidores solares permiten aumentar notablemente la producción de energía como se mencionó en el capítulo 3, por tanto mejoran la rentabilidad de los proyectos y el retorno de la inversión realizada en un menor período respecto a estructuras fotovoltaicas fijas.[8]

Existen diferentes tipos de seguidores solares de acuerdo a su estructura, dentro de los más comunes se pueden encontrar:

- Seguidores solare de un eje: están compuestos de una estructura que presenta un grado de libertad. La plataforma gira sobre un eje vertical, además, presentan una mayor imprecisión al momento de captar la energía.
- Seguidores solares de dos ejes: estos cuentan con dos grados de libertad, brindan una mayor captación de la energía ya que la estructura siempre está perpendicular a los rayos del Sol.

Estos también se pueden clasificar de acuerdo al sistema de seguimiento que utilicen, ya que para determinar la posición del Sol se pueden utilizar:

- Seguidores por punto luminoso: utilizan un sensor que le indica cuál es el punto del cielo donde hay mayor luminosidad. Presentan la ventaja de que su implementación es sencilla pero su fiabilidad es baja, en especial en días nublados.
- Seguidores por programación astronómica: implementan algoritmos matemáticos como el desarrollado en el capítulo 2, su implementación resulta un poco más complicada, pero representan sistemas robustos y de alta fiabilidad.[23]

Un sistema de un solo eje brinda ciertas ventajas ya que la cantidad de partes móviles es menor respecto a un seguidor de 2 ejes, por lo tanto, el mantenimiento del mismo es más sencillo, así como su diseño y costo de producción. La figura 4.4 muestra los tipos de seguidores solares mencionados anteriormente.

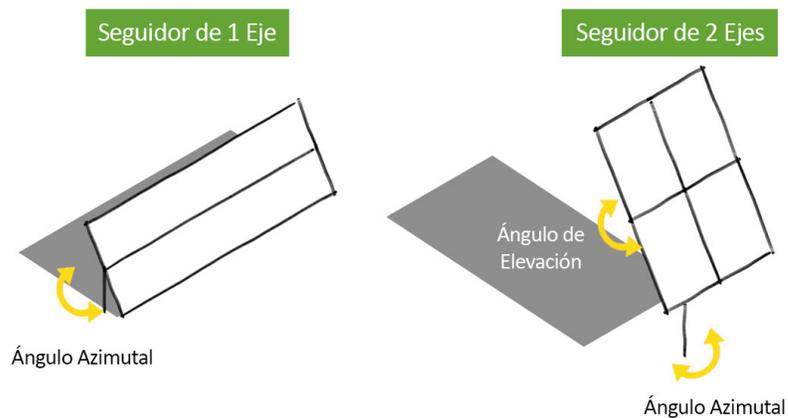


Figura 4.4: Tipos de seguidores solares.[8]

Capítulo 5

Tipos de comunicación inalámbrica

La integración de los dispositivos móviles, Internet y la conectividad inalámbrica brindan una excelente oportunidad para realizar proyectos en los cuales la utilización de cables se dificulta o no es posible.

Gran parte de los nuevos dispositivos están preparados para la conectividad inalámbrica en Redes de Áreas Personales, Locales y Extensas por sus siglas en inglés PAN, LAN y WAN respectivamente. Son muchas las organizaciones que, a partir de estándares abiertos, proporcionan hardware, software y controladores complementarios para adecuarse a los métodos de conectividad inalámbrica.[24]

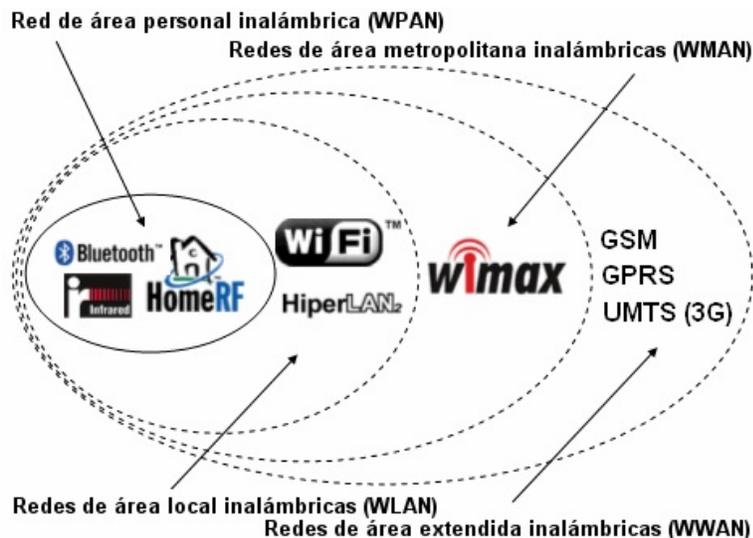


Figura 5.1: Tipos de redes inalámbricas.[9]

5.0.1 Comunicación WiFi

La tecnología WiFi es un tipo de comunicación inalámbrica mediante ondas, la cual es una de las más utilizadas hoy en día, también suele ser llamada WLAN (wireless Lan o red inalámbrica) o estándar IEEE 802.11.

En la actualidad existen dos tipos de comunicación WiFi:

- 802.11b, que emite a 11 Mb/seg.
- 802.11g, que emite a 54 MB/seg. [25]

Su alcance que se aproxima a 100-150 metros, según factores como el lugar donde se utiliza, ya sea en lugares abiertos o si su uso es dentro de edificaciones, así como su velocidad la convierten en una tecnología ideal para el acceso a Internet sin cables.

Existen diversas formas y tipos de seguridad en estas redes, algunas de ellas son la utilización de protocolos de cifrado de datos para los estándares WiFi como el WEP, el WPA, o el WPA2 que se encargan de codificar la información transmitida para proteger su confidencialidad.[26]

Algunas ventajas que presenta dicha tecnologías son:

- Instalación simple.
- Gran diversidad de dispositivos utilizan dicha tecnología.
- Robusta y confiable.
- Alta velocidad de transmisión de datos y gran alcance.
- Una red WiFi soporta gran cantidad de dispositivos conectados al mismo tiempo.

5.0.2 Comunicación Bluetooth

La tecnología inalámbrica Bluetooth es una tecnología de ondas de radio de corto alcance, es decir funciona en áreas pequeñas, incluso a través de obstáculos. Dependiendo de la versión puede llegar a tener un gran alcance. Su principal función es eliminar el uso de cables, facilitando la comunicación entre diferentes dispositivos electrónicos como teléfonos celulares, computadoras, cámaras entre otros más.[27]

Algunas características de esta tecnología son:

- Utiliza ondas de radio para la comunicación con un ancho de banda de 2.4 GHz.
- La clase 1 tiene alcance de 100 metros con consumos de 100 mW mientras que la clase 4 tiene un rango de 0.5 metros y un consumo de 0.5 mW.
- La versión 1.0 tasa de transmisión fue de aproximadamente 721 kbps mientras que la última versión 5.0 tiene una tasa de transmisión del doble de su versión anterior la cual posee un rango de 25 Mbps hasta 32 Mbps.[28]

Capítulo 6

Módulo fotovoltaico

Luego de conocer los diferentes tipos de seguidores solares que existen en el mercado y sus formas de ser implementados, así como algunas de sus características y tomando en cuenta que lo que busca el proyecto es la implementación de un seguidor solar de bajo costo y poco mantenimiento. Se utiliza la estructura realizada por el Ing. Sebastián Romero Vargas, la cual pertenece al SESLab.[29]

El sistema corresponde a una estructura monosoporte de un solo eje de rotación, esto con el fin de reducir los costos, además, por la posición geográfica que presenta Costa Rica no es necesario implementar un sistema de dos ejes de rotación, ya que su cercanía al Ecuador le brindan una posición privilegiada. Los sistemas de dos ejes de rotación son implementados en especialmente en zonas ubicadas muy al norte o al sur del Ecuador.

En la estructura se utiliza un actuador lineal de la marca WindyNation con una extensión máxima de 30 pulgadas. Con esta extensión se logra obtener una estructura simple y con un desplazamiento angular bastante amplio. El desplazamiento angular del panel es de 100° aproximadamente, es decir tiene una rotación de 50° este y 50° hacia el oeste. Dicho actuador tiene una capacidad de carga de hasta 225 libras con una tensión eléctrica de operación de 12V máximo y una corriente menor a 2.5A. La hoja de datos referente al actuador lineal se encuentra en el apéndice B

Además, la planta utiliza un panel fotovoltaico monocristalino de una potencia máxima de 255 Watts de la compañía Canadian Solar. A su vez, se debe utilizar un microinversor para la conversión de DC a AC y un CDD para el monitoreo de potencia del panel. Para esto se utilizan los microinversores Aurora MICRO-0.25-I de la compañía Power-One con una capacidad de 255 Watt. La figura 6.1 presenta la estructura descrita anteriormente. Mientras que la figura 6.2 muestra el CDD y el microinversor a utilizar. La información del panel solar se puede encontrar en el apéndice A



Figura 6.1: Módulo fotovoltaico.



Figura 6.2: CDD y Microinversor.

Capítulo 7

Hardware

7.1 Microcontrolador

Para el presente proyecto se utiliza el Adafruit Feather M0 WiFi el cual es un microcontrolador que brinda los recursos necesarios para la elaboración del proyecto, ya que tiene un microprocesador ATSAM21G18 ARM Cortex con un reloj de 48 MHz, tiene además 10 entradas analógicas y 8 pines PWM los cuales serán necesarios para leer los datos brindados por el acelerómetro y controlar el motor con un PWM al momento de realizar el sistema de control. Otra característica importante es su bajo precio y su tamaño compacto. Una ventaja es su bajo consumo de potencia ya que si es alimentado con un puerto USB 2.0 su consumo sería de 2.5W máximo, además, presenta el adaptador para una batería de ion-litio la cual será necesaria, ya que el módulo final no contará con redes eléctricas cercanas para su alimentación. Su principal característica es que posee un módulo WiFi ATWINC1500 que trabaja con redes 802.11b, g, o n. Soporta protocolos de seguridad WEP, WPA y WPA2. Lo cuál será necesario para la transmisión de diversos datos a un dispositivo de visualización remota.[30] En la Figura 7.1 se muestra el microcontrolador a utilizar.

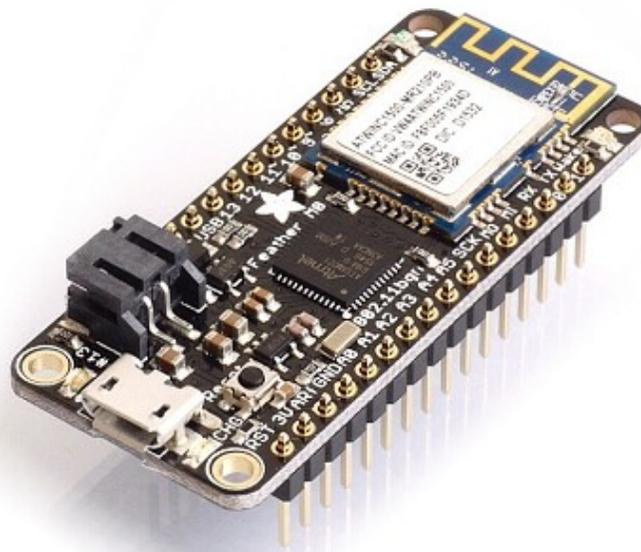


Figura 7.1: Adafruit Feather M0 WiFi.[10]

7.2 Acelerómetro

Luego de definir el microcontrolador a utilizar es necesario utilizar un sensor para medir el ángulo de inclinación del sistema, algunos dispositivos como potenciómetros o encoders brinda una gran precisión al momento de medir, pero estos tienen que estar sujetos a un eje rotacional que se mueva con la estructura por lo tanto en el presente caso no funcionan ya que la estructura rota sobre el eje y no está adherida al mismo. Debido a esto, se recurrió al uso de acelerómetros debido a su bajo costo y su cómodo tamaño. Para realizar las mediciones con el Feather M0 se utilizó el acelerómetro ADXL335 que posee una resolución de 0.3 mV/g en cada una de sus salidas X_{out} , Y_{out} , Z_{out} . Además, se alimenta con una tensión eléctrica de 3V el cual es brindado por el mismo microcontrolador.[31]

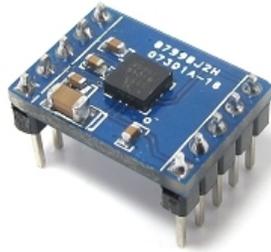


Figura 7.2: Acelerómetro ADXL335.

El acelerómetro no mide directamente el ángulo, pero a partir de los valores leídos de gravedad se puede calcular el ángulo como se explica en [32]. Este código fue modificado y ajustado para la aplicación, un cambio importante fue la referencia del ADC que se ajustó hasta obtener los valores correctos de los ángulos, así como el valor de tensión de cada eje cuando este está en cero.

Uno de los principales problemas que presenta el acelerómetro es su inestabilidad en especial cuando es expuesto al sol directamente o cuando se coloca sobre la superficie del panel solar.

Se realizó una serie de experimentos para determinar cuál es el mejor lugar para colocar el sensor. Las siguientes figuras muestran este comportamiento.

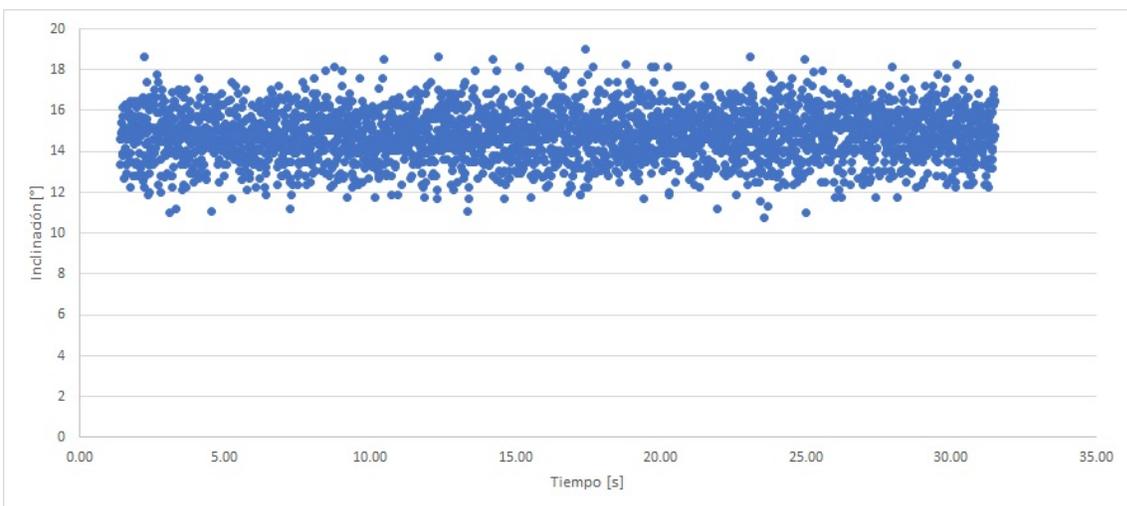


Figura 7.3: Sensor colocado sobre el panel solar.

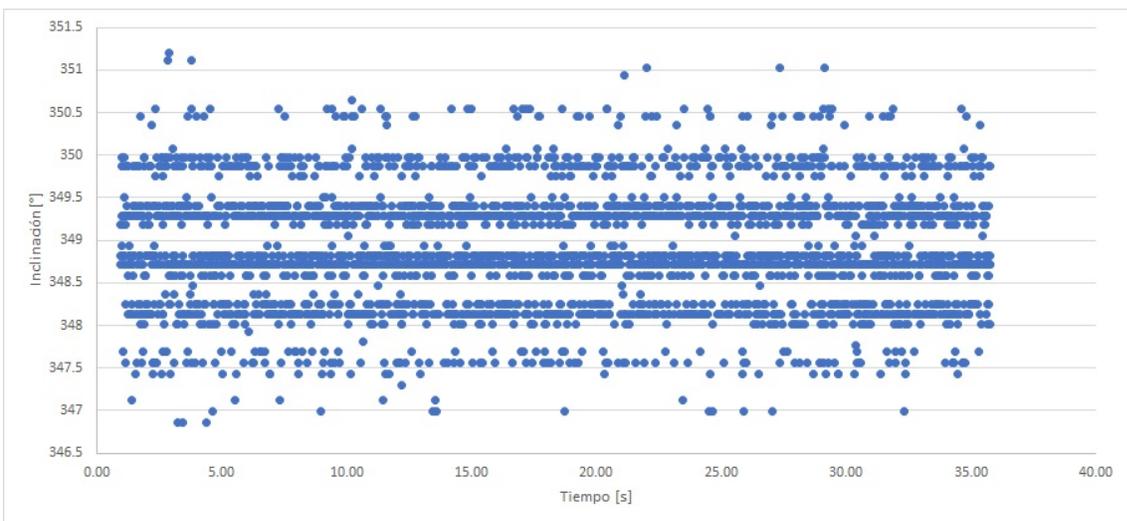


Figura 7.4: Sensor colocado debajo del panel solar.

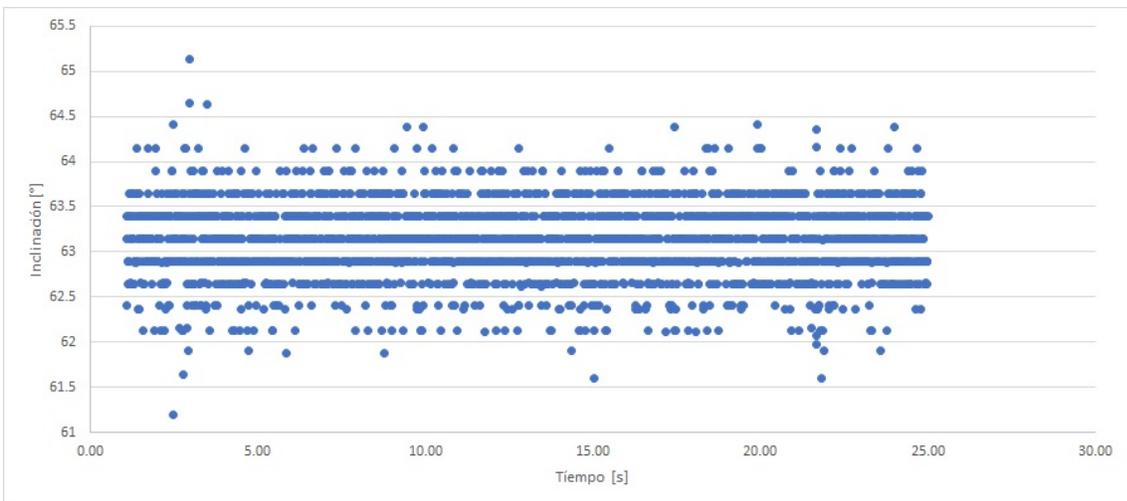


Figura 7.5: Sensor colocado en la sombra.

Como es posible apreciar en la figura 7.3 la variación de los datos es cercana a los 10° cuando el sensor se coloca directamente al sol, mientras que si el sensor se coloca debajo del panel, es decir, colocarlo indirectamente al sol la variación de sus datos se aproxima a los 5° como muestra la figura 7.4, por otra parte, si este está en la sombra la variación de los datos es de $3 - 4^\circ$ aproximadamente como se aprecia en la figura 7.5. Por lo tanto, el sensor debe ser colocado en una zona de la estructura donde se encuentre bajo una sombra, es decir que no reciba los rayos del sol directamente.

Debido a la inestabilidad de los datos dados por el acelerómetro es necesario implementar un filtro de media móvil, estos con el fin de brindar un dato más preciso y evitar errores en el sistema. Sin embargo, ciertos factores como el viento pueden provocar una variación de 1° en la medición del ángulo, sin embargo el sistema de control será capaz de corregir estos errores.

7.3 Puente H

La estructura debe ser capaz de rotar en ambos sentidos, es decir de este a oeste conforme el sol cambia su posición y luego debe regresar a su posición original, por lo tanto, debe rotar en sentido contrario. Además, antes la presencia de perturbaciones esta debe regresar a la posición deseada. Por lo que es necesario lograr que el motor gire en ambas direcciones. Para esto se utiliza el Puente-H L293N el cual es parte de un módulo que tiene dos salidas, es decir se pueden controlar dos motores. También tiene dos entradas, una para cada motor. Y requiere de una fuente de alimentación de 12 o 5 V. El módulo a utilizar se muestra en la figura 7.6

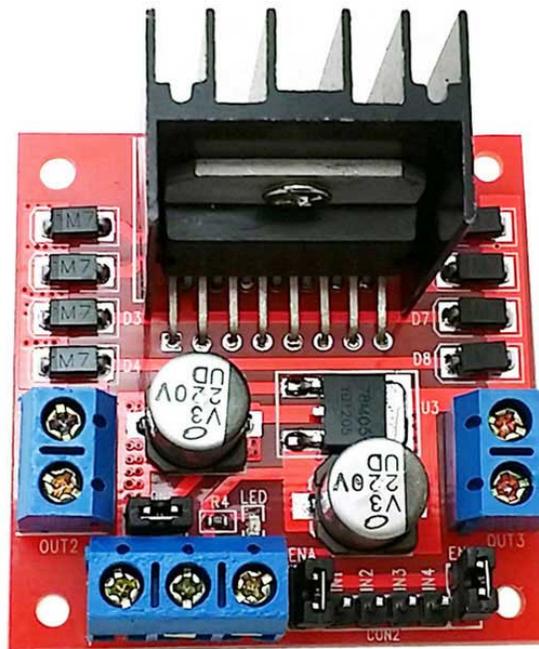


Figura 7.6: Puente-H L293N.

Para lograr el cometido anterior, se utiliza una salida PWM del microcontrolador para habilitar y deshabilitar el "enable" del Puente-H. Y con un algoritmo se establecen las salidas analógicas en alto o bajo para determinar en que sentido gira el motor. La tabla 7.1 muestra las diferentes configuraciones del Puente-H y su respuesta.

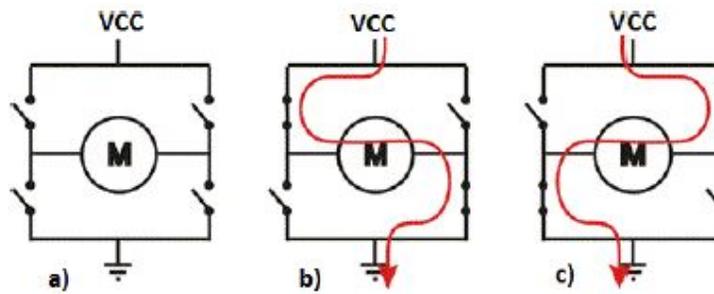


Figura 7.7: Sentido de giro Puente-H L293N.

L293N			
ENA	IN1	IN2	Estado del motor [%]
L	X	X	Gira Libre
H	L	L	Detenido
H	H	L	Velocidad máx (derecha)
H	L	H	Velocidad máx (izquierda)
H	H	H	Detenido
PWM	H	L	Velocidad controlada PWM (derecha)
PWM	L	H	Velocidad controlada PWM (izquierda)

Tabla 7.1: Configuración de giro para el Puente-H L293N.

Capítulo 8

Sistema de control

8.1 Modelo dinámico de un sistema

El modelo dinámico de un sistema es aquel que describe el comportamiento del mismo, el cual cambia con el pasar del tiempo. Con el modelo dinámico se describen las secuencias de operaciones que ocurren como respuesta a estímulos externos.[33]

El sistema a utilizar corresponde a un sistema SISO (Single input - single output) por sus siglas en inglés, es decir, un sistema que cuenta con una entrada y una salida. Esto se debe a que la entrada en el motor corresponde a una tensión eléctrica $U(t)$ la cual tiene unidades de voltios [V] y la salida sería en este caso el ángulo de inclinación de la planta $\theta(t)$ que tiene unidades de grados [°]. La Figura 8.1 muestra el sistema mencionado anteriormente.



Figura 8.1: Sistema SISO.

Para la obtención del modelo dinámico se estimula el sistema con una tensión máxima de entrada de 12 V que es lo que soporta el motor del actuador lineal. Y se debe de medir la salida del mismo, es decir, medir el ángulo de inclinación del panel solar. Al tener estos datos se puede utilizar la función "ident" que brinda la herramienta matemática Matlab para poder tener la mejor aproximación del sistema y con esto su función de transferencia.

Para la recolección de datos se utilizaron los componentes mencionados anteriormente, así como el panel junto con su sistema electro-mecánico. Debido a la gran inestabilidad del sensor y la gran variación entre sus datos, se recurrió a emplear un filtro de media móvil y de esta manera reducir la varianza entre mediciones. Este filtro consiste en realizar un promedio de un conjunto de datos.

El filtro de media móvil brinda la ventaja de tener menos varianza en el ángulo de salida del sis-

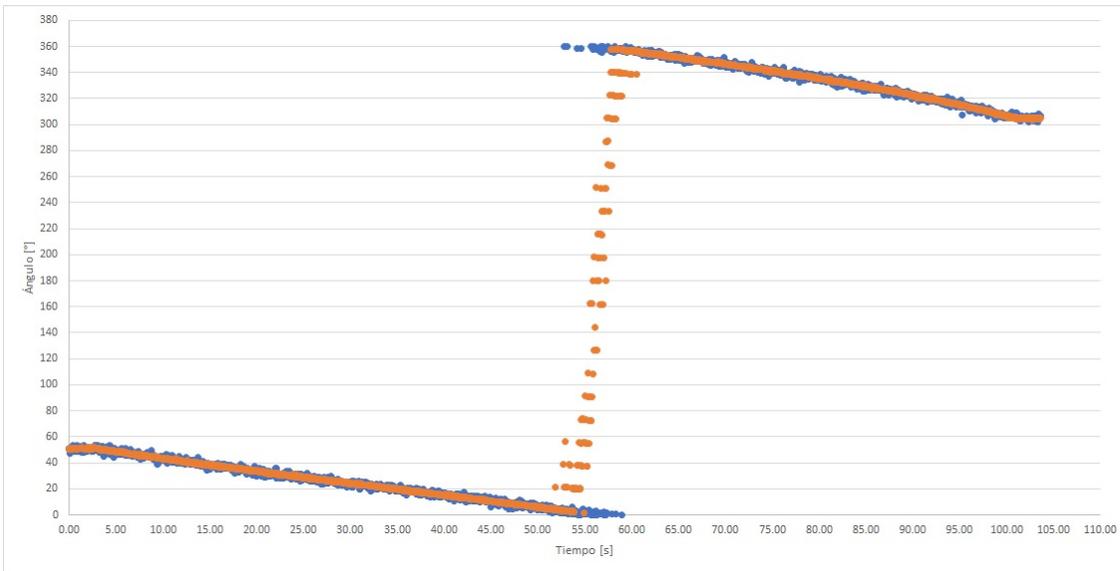


Figura 8.2: Ángulo de salida sin media móvil (celeste) y ángulo de salida con media móvil (naranja) para una tensión de entrada de 10V.

tema como se muestra en la figura 8.2 pero al mismo tiempo provoca un retardo de 24ms en el procesamiento de la información, esto se debe a que se realiza un promedio de 20 datos. En caso de bajar la cantidad de datos para el promedio, baja el tiempo de muestreo. El proceso como tal tarda 26 ms, por lo que se estableció un tiempo de muestreo de 50ms, esto con el fin de que exista un margen lo suficientemente amplio al momento de implementar el sistema de control.

Además, para guardar los datos de una manera sencilla y tener una fácil manipulación de los mismos se utilizó PLX-DAQ el cual permite enviar por el puerto serie la información deseada a un documento de Excel junto con el tiempo de muestreo.

Se realizaron varios tipos de experimentos uno de ellos con una tensión eléctrica de entrada de 10V y otro con una de 12V. Esto con el fin de poder comparar el tiempo que tarda el sistema en realizar su recorrido. Las figuras 8.3 y 8.4 muestran con más detalle los resultados obtenidos. Para una tensión de 10V la estructura tarde aproximadamente 50s en llegar a 0° mientras que para 12V tarda aproximadamente 40s, es decir, 10s menos.

Luego de realizar la serie de mediciones descritas se utilizó Matlab para obtener la función de transferencia del sistema. Matlab posee una función llamada *ident*, en la cual se ingresan los datos de entrada y salida, así como el vector de tiempo y esta brinda la mejor aproximación del sistema. La ecuación 8.1 corresponde a la función de transferencia obtenida con una tensión eléctrica de entrada de 10V y la ecuación 8.2 al caso de una tensión eléctrica de 12V en la entrada del sistema.

$$H(s) = \left(\frac{-0.085075}{s + 0.003569} \right) \quad (8.1)$$

$$H(s) = \left(\frac{-0.077775}{s + 0.007687} \right) \quad (8.2)$$

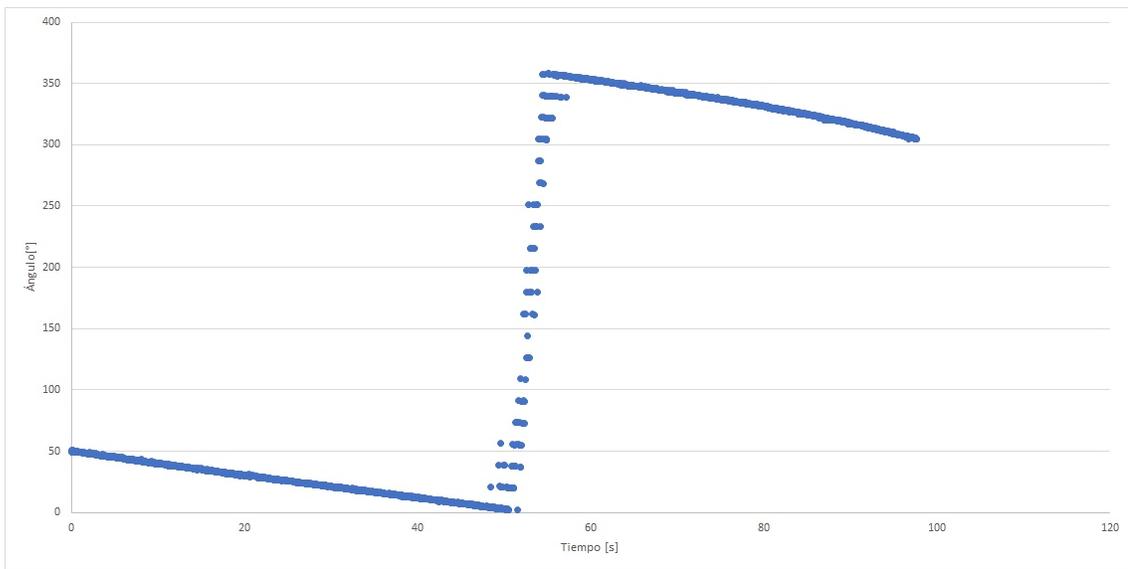


Figura 8.3: Inclinación del panel en una trayectoria de Este a Oeste con 10V de alimentación.

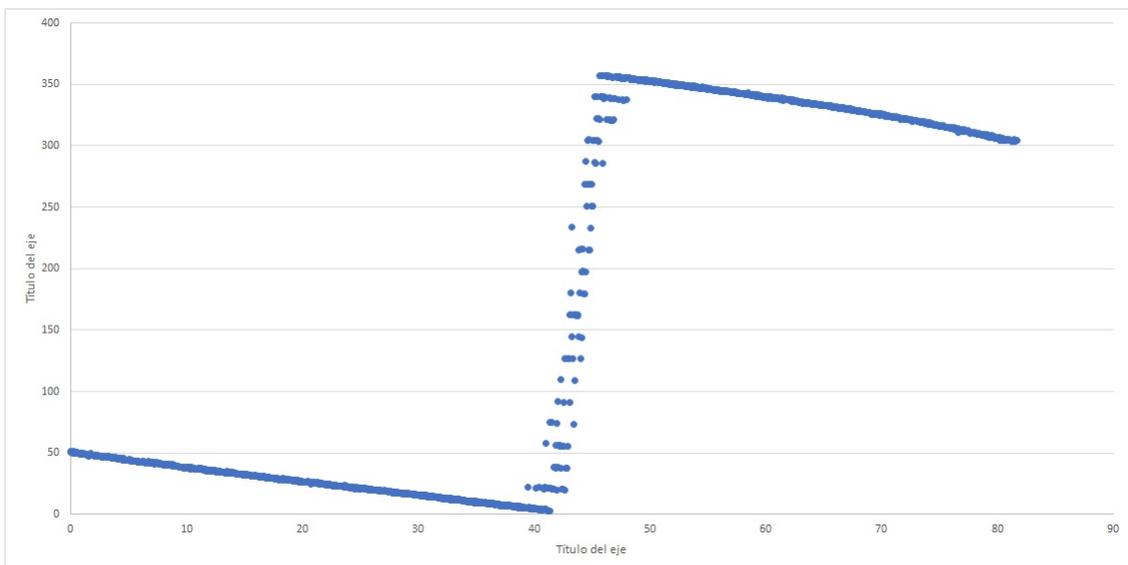


Figura 8.4: Inclinación del panel en una trayectoria de Este a Oeste con 12V de alimentación.

Ambas funciones de transferencia son muy similares y en ambos casos el valor del polo puede ser despreciado debido a que su valor es casi cero, por lo tanto, ambas funciones de transferencia podrían simplificarse y se tendría el caso de un integrador.

$$H(s) = \left(\frac{-0.085075}{s} \right) \quad (8.3)$$

$$H(s) = \left(\frac{-0.077775}{s} \right) \quad (8.4)$$

Para corroborar el correcto funcionamiento de la función de transferencia se utilizó *Simulink* de Matlab con la cual se creó el diagrama que se muestra en la figura 8.5 y se obtuvo el resultado que muestra la figura 8.6.

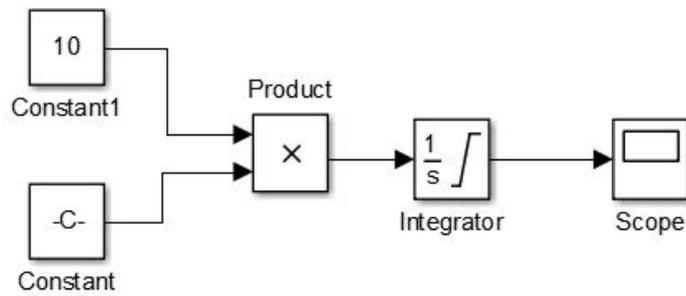


Figura 8.5: Diagrama en Simulink.

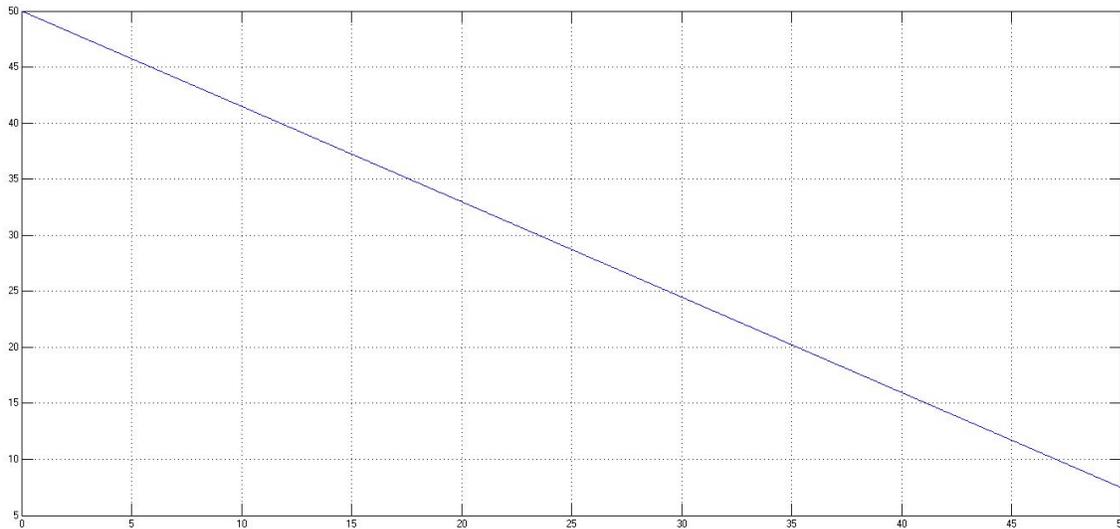


Figura 8.6: Ángulo de salida utilizando la función de transferencia 8.3.

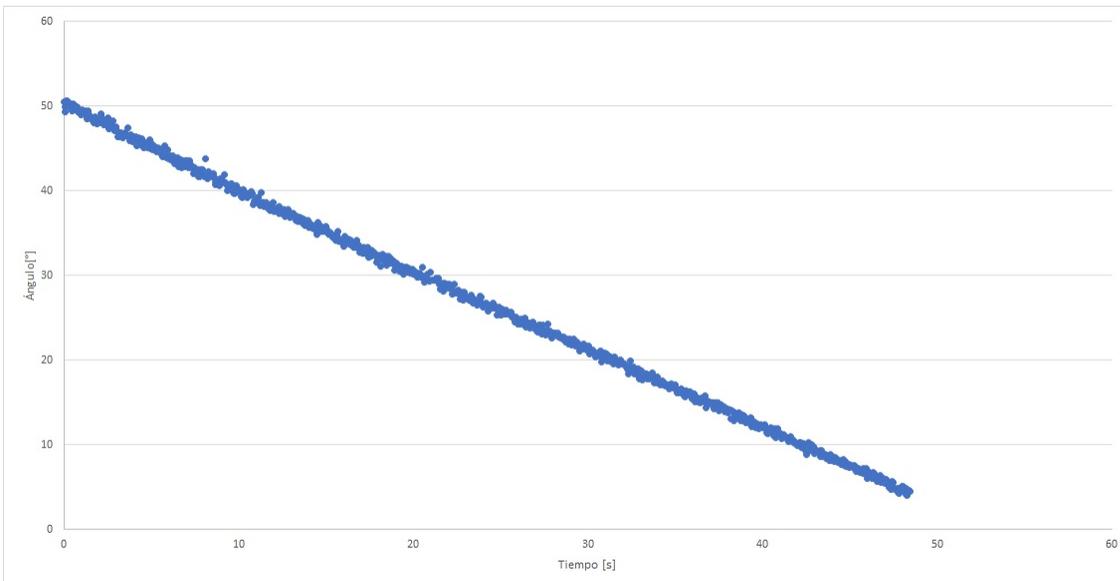


Figura 8.7: Ángulo de salida dado por el acelerómetro ADXL335.

Tanto la figura 8.6 como la 8.7 presentan un comportamiento lineal muy similar. Con esto se puede asegurar que es posible simplificar la función de transferencia a las formas 8.3 y 8.4.

8.2 Diseño del Sistema de control

Existen diferentes formas de diseñar un sistema de control, algunos de estos sistemas presentan ciertas ventajas al momento de ser implementados y diseñados mientras que para otros las desventajas son notorias. Algunos ejemplos de diseño con los cuales se puede implementar un sistema de control son:

- Controladores PID
- Respuesta en frecuencia
- Realimentación de estados
- Lugar de las raíces
- Según el comportamiento del sistema

Existen sistemas en lazo abierto en los cuales la acción de salida no es contemplada en la entrada, es decir la acción de control es independiente de la salida, este método presenta un diseño sencillo pero su desventaja es que es incapaz de actuar ante perturbaciones y son pensados especialmente para proceso en los cuales la señal de salida no influye en su regulación.[34]

Por otra parte, están los sistemas en lazo cerrado en los cuales la acción de control depende de la salida, la cual es realimentada a la entrada. La gran mayoría de estos sistemas busca que el error en estado estacionario sea cero, es decir que la señal de salida que es realimentada sea igual a la referencia del sistema, por lo tanto al ser restadas el error es cero.[34]

En el módulo fotovoltaico a utilizar, se implementa un sensor para medir el ángulo al cual se encuentra la planta (θ), es decir, su ángulo de salida. La salida debe ser realimentada para lograr que el error en estado estacionario (e) sea cero respecto a una referencia que es dada por (θ^*), el cual corresponde al ángulo cenital obtenido de la ecuación 8.5, en la cual δ corresponde a la declinación solar que depende del día del año (d), además, ϕ representa la latitud y ω la hora solar que depende de la hora (h) y los minutos (min). G_c corresponde a una ganancia y $\frac{K}{s}$ describe el comportamiento de la planta descrito en la sección 8.1. La figura 8.8 muestra el sistema descrito anteriormente.

$$\cos(\theta^*) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega) \quad (8.5)$$

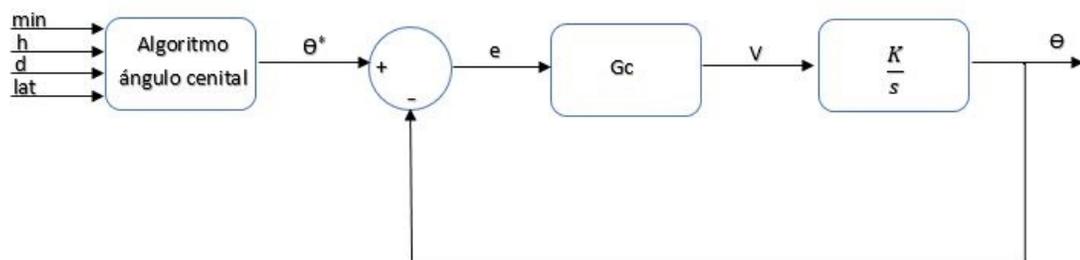


Figura 8.8: Diagrama de bloques de la planta junto con el sistema de control en lazo cerrado.

Ahora la ganancia en lazo cerrado del sistema está dada por la ecuación 8.6

$$G_{cl} = \frac{\frac{K}{s}G_c}{1 + \frac{K}{s}G_c} \quad (8.6)$$

Suponiendo G_c como

$$G_c = \frac{N_c}{D_c} \quad (8.7)$$

Sustituyendo 8.7 en 8.6 y simplificando se obtiene

$$G_{cl} = \frac{KN_c}{D_c s + KN_c} = \frac{Y(s)}{\theta^*(s)} \quad (8.8)$$

Suponiendo que la entrada $\theta^*(s)$ es un escalón $\theta^*(s) = \frac{\bar{\theta}^*}{s}$ se tiene que la salida está dada por

$$Y(s) = \frac{\bar{\theta}^*}{s} \frac{KN_c}{D_c s + KN_c} \quad (8.9)$$

Haciendo el límite de 8.9 cuando s tiende a cero para obtener el error del sistema y simplificando se obtiene

$$\lim_{s \rightarrow 0} (sY(s)) = \lim_{s \rightarrow 0} \bar{\theta}^* \left(\frac{KN_c}{D_c s + KN_c} \right) \quad (8.10)$$

A partir de 8.8, N_c corresponde a una constante y asumiendo D_c como un polo en a .

$$D_c = (s + a) \quad (8.11)$$

Por lo tanto, la ecuación característica de 8.8 sería

$$s^2 + as + KN_c = 0 \quad (8.12)$$

Realizando la sustitución de 8.11 en 8.7 se obtiene la forma del controlador.

$$G_c = \frac{N_c}{s + a} \quad (8.13)$$

Obteniendo las raíces de la ecuación característica (8.12).

$$s = -a \pm \sqrt{\frac{a^2 - 4KN_c}{2}} \quad (8.14)$$

Con el fin de obtener una respuesta sobreamortiguada como se muestra en la figura 8.9 se debe cumplir la condición 8.15.

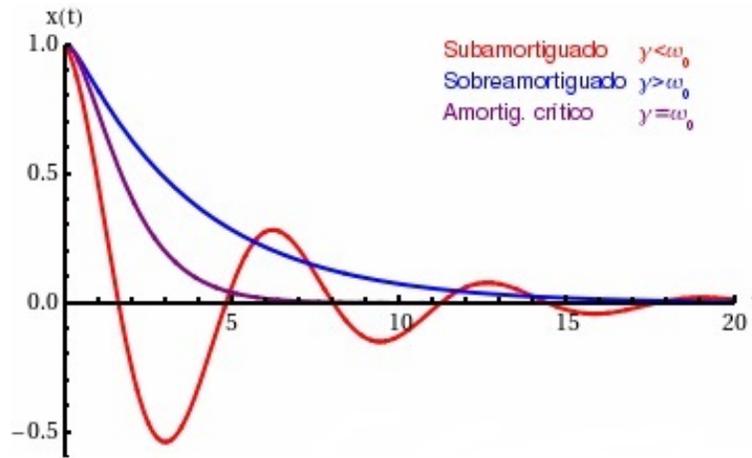


Figura 8.9: Tipos de respuesta de los sistemas.[11]

$$a^2 > 4KN_c \quad (8.15)$$

Para obtener una segunda ecuación y determinar los valores de a y N_c se parte del comportamiento de un sistema sobreamortiguado como lo describe la ecuación 8.16.

$$x(t) = K_1 e^{-\lambda_1 t} + K_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (8.16)$$

Es necesario encontrar el λ más pequeño, para que la respuesta sea lo más rápida posible, el cual corresponde a

$$\lambda_m = -a + \sqrt{\frac{a^2 - 4KN_c}{2}} \quad (8.17)$$

$$|\lambda_m t| = 5 \quad (8.18)$$

Tomando en cuenta que el sistema recorre 5° aproximadamente en 5 segundos, se toma que $t = 12s$ por lo que λ_m tiene un valor de $\lambda_m \approx 0.42$. Ahora con la condición de la ecuación 8.15 y la ecuación 8.17 se tiene el siguiente sistema de ecuaciones para determinar los valores de N_c y a .

$$a^2 > 4KN_c \quad (8.19)$$

$$0.42 = -a + \sqrt{\frac{a^2 - 4KN_c}{2}} \quad (8.20)$$

Despejando el sistema de ecuaciones descrito anteriormente y tomando el valor de K de 8.3 se tiene que

$$a > -0.42 \quad (8.21)$$

Por simplicidad se toma $a = 1$ y se determina el valor de N_c .

$$N_c = 8.9121 \quad (8.22)$$

Por lo tanto, el sistema de control está dado por la ecuación 8.23 para un sistema con una tensión eléctrica de entrada de 10V.

$$G_c = \frac{8.9121}{s + 1} \quad (8.23)$$

Para poder implementar la ecuación 8.23 en el microprocesador Adafruit Feather M0 es necesario realizar la transformada de z, esto con el fin de pasar de tiempo continuo a tiempo discreto. Realizando este proceso se obtiene la ecuación 8.24.

$$G_c(z) = \frac{0.4346}{z - 0.9512} \quad (8.24)$$

Luego es necesario realizar la transformada inversa de z, esto con el fin de tener la ecuación en términos del error del sistema.

$$\frac{53 * (1189/1250)^n}{116} - \frac{53 * \text{kronckerDelta}(n, 0)}{116} \quad (8.25)$$

La ecuación 8.25 está en términos de n, el cual representa el error actual del sistema y la función $\text{kronckerDelta}(m, n)$ corresponde a una función escalón, que retorna un 1 si $m == n$ y un 0 si $m \neq n$.

Capítulo 9

Circuito implementado

Luego de realizar una breve descripción del hardware que se utiliza en el diseño electrónico, la figura 9.1 muestra un diagrama en el cual se puede ver las diferentes conexiones de los componentes.

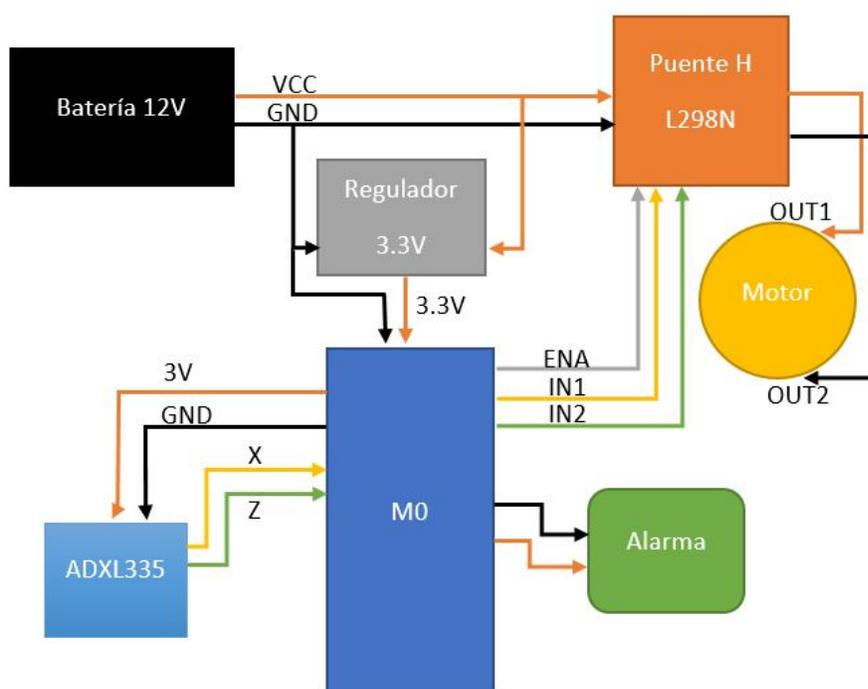


Figura 9.1: Diagrama del circuito implementado

La fuente de alimentación corresponde a una batería de ácido de 12V y 4500mAh la cual brinda energía al sistema a lo largo de dos días completos, debido al poco tiempo de funcionamiento fue necesario utilizar un cargador de 12V conectado a la red. El regulador de 3.3V cumple la función de regular la tensión eléctrica para alimentar el microcontrolador.

Las salidas del acelerómetro ADXL335 son salidas analógicas, mientras que las señales de control del puente H son salidas digitales. Por otra parte la alarma es activada por un puerto digital en caso de un error de posición mayor al 5%.

La figura 9.2 muestra una foto real del circuito implementado. Fue necesario girar el acelerómetro

180° para una mejor tabulación de los datos por lo tanto se encuentra en la parte inferior de la placa perforada.

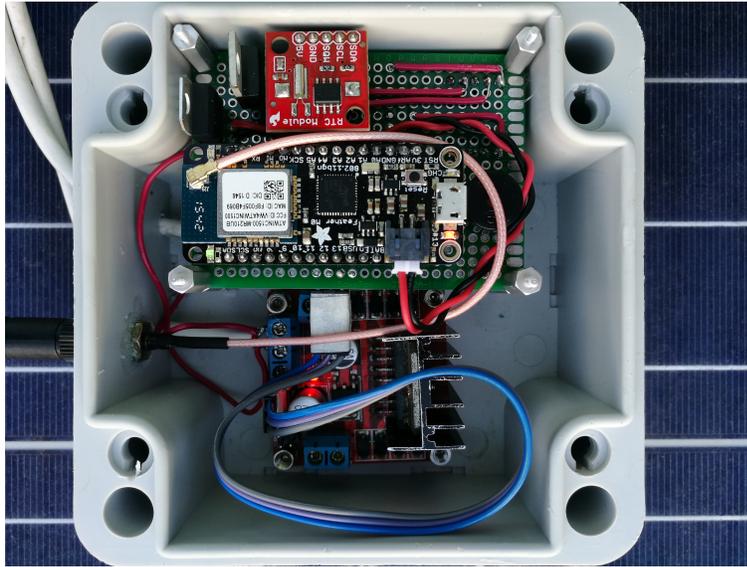


Figura 9.2: Circuito real implementado

Es necesario utilizar una caja IP65 debido a que el sistema se encuentra a la interperie, por lo tanto debe ser capaz de resistir el polvo, humedad, entre otros factores. Otro componente que se utilizó fue un RTC, inicialmente se usó el RTC interno que brinda el Feather M0, esto con el fin de utilizar los recursos del microcontrolador, debido a que este RTC interno se reinicia cuando el sistema no está alimentado, se incorporó uno externo que cuenta con una batería para guardar la hora y fecha en caso de que la planta no cuente con alimentación. La figura 9.3 muestra el prototipo final.

El consumo promedio de todo el circuito es aproximadamente 300mA de manera constante pero debido a los picos de corriente del motor cuando arranca este consumo se puede elevar hasta los 600mA.



Figura 9.3: Prototipo final

Capítulo 10

Resultados y análisis de la implementación del sistema

Antes de realizar un análisis de resultados finales es importante recalcar que debido al tipo de proyecto que se está implementando, el cual depende de las diversas condiciones climatológicas que se pueden presentar a diario, no es posible determinar el máximo potencial del seguidor solar. En especial por la zona tropical en la que se ubica Costa Rica, además de esto, las mediciones fueron realizadas a finales de octubre e inicios de noviembre, dos de los meses más lluviosos del año. Por otra parte, el lugar donde se realizaron las mediciones, el cual corresponde al Tecnológico de Costa Rica en la ciudad de Cartago, es una zona bastante nubosa en la cual predominan constantes lluvias.

Como se mencionó en el capítulo 4 fue necesaria la implementación de microinversores, así como un CDD para el monitoreo de potencia de ambos módulos fotovoltaicos. Mediante una página web es posible visualizar los datos de producción energética y potencia a lo largo de todo el día, en intervalos de 15 minutos. Además de esto, mediante Thingspeak es posible verificar el funcionamiento del sistema ya que se puede visualizar en tiempo real el ángulo de inclinación del mismo.

Las figuras 10.1 y 10.2 muestran las herramientas para el monitoreo de potencia y el ángulo de inclinación del módulo fotovoltaico. En la figura 10.1 la gráfica muestra la potencia acumulada tanto por el seguidor como el módulo con inclinación fija, sin embargo es posible obtener la potencia de cada módulo en diferentes horas.

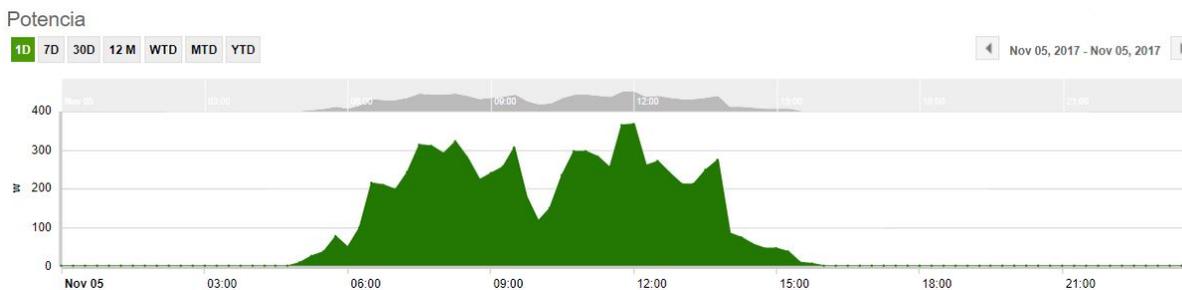


Figura 10.1: Potencia acumulada para el día 5 de Noviembre

Para la medición del ángulo cenital fue necesario realizar un análisis de los datos con matlab, ya que para tiempos de muestreo no es posible visualizar los datos de cada canal durante todo el día.

La figura 10.2 muestra tanto el ángulo teórico como el experimental para el día 8 de Noviembre del 2017 con un tiempo de muestreo de 3 minutos y 15 segundos aproximadamente.

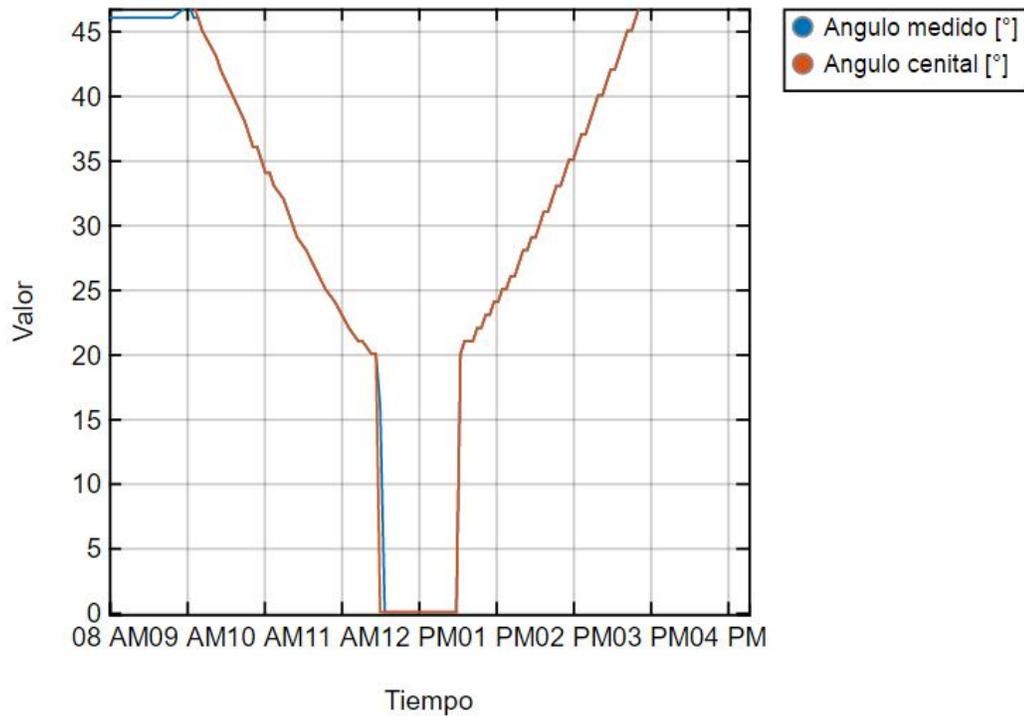


Figura 10.2: Ángulo cenital teórico y ángulo de inclinación de la planta.

Realizando una análisis de la figura 10.2 se aprecia como el ángulo medido es decir el ángulo de inclinación del módulo fotovoltaico se mantiene constante antes de que el ángulo teórico sea 47° aproximadamente, es decir su inclinación máxima hacia el este. Luego de empezar su funcionamiento el mismo se mantiene con porcentajes de error muy cercanos a cero respecto al ángulo cenital teórico. Al ser las 11:30 am, debido a que el ángulo cenital toma valores de 0° a 90° y su trayectoria no varía de este a oeste de manera lineal, es necesario poner el módulo con una inclinación de 0° y al ser las 12:30 pm gira su posición hacia el oeste y vuelve a tomar los valores del ángulo cenital.

Las figuras 10.3 y 10.4, muestran los valores del ángulo cenital y el ángulo de inclinación del sistema, con datos enviados cada 15 minutos, tiempo que se puede configurar desde la programación. El monitoreo del ángulo medido se realiza durante todo el día para verificar la correcta posición del seguidor solar, mientras que el ángulo cenital, ángulo teórico, se monitorea únicamente en el margen que puede funcionar el seguidor solar.

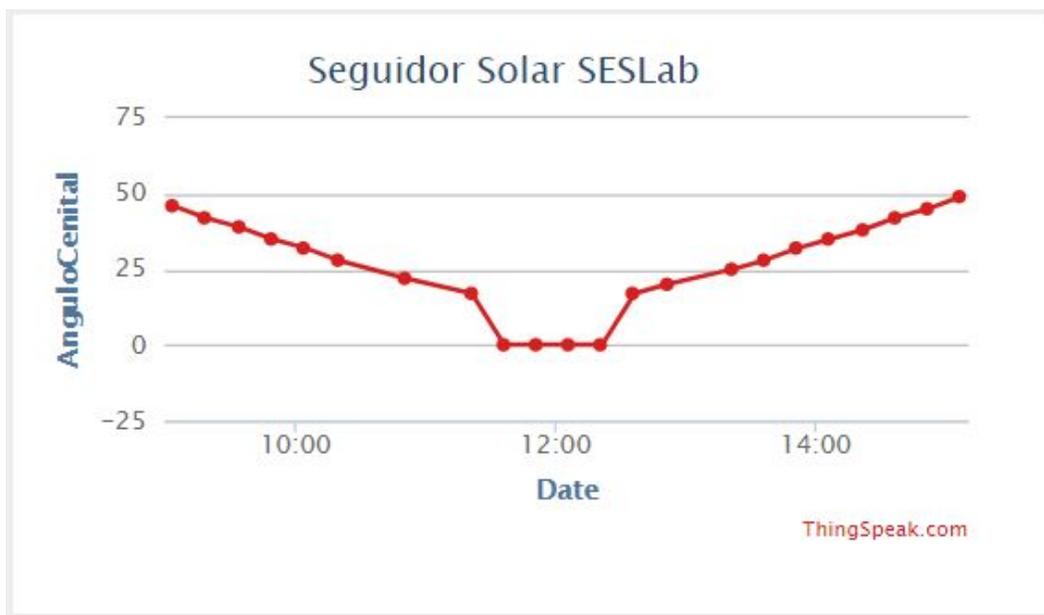


Figura 10.3: Ángulo teórico con tiempo de muestreo de 15 minutos.

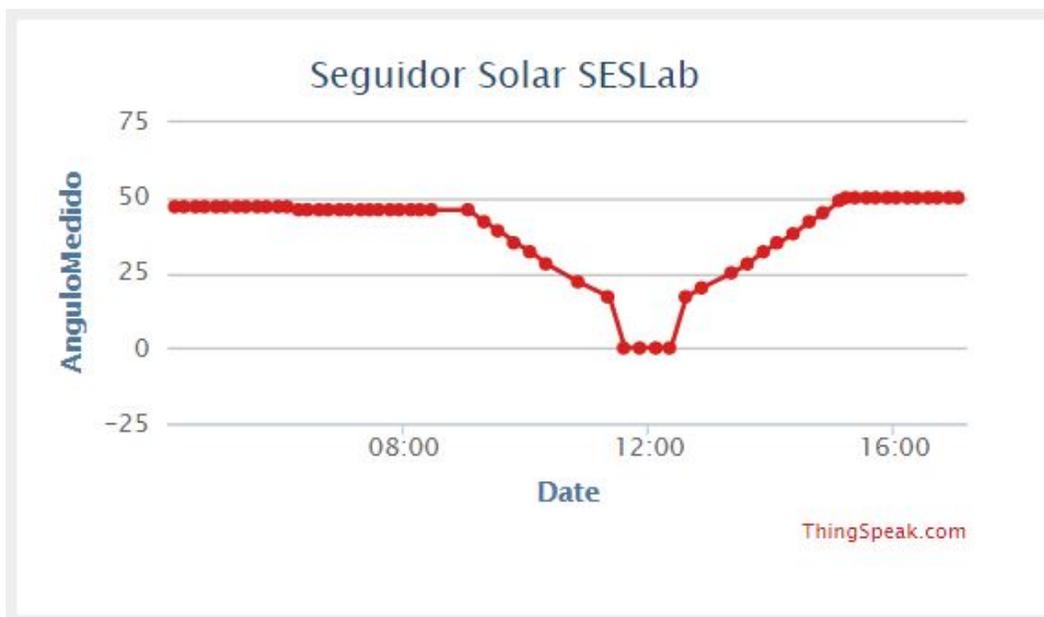


Figura 10.4: Ángulo experimental con tiempo de muestreo de 15 minutos.

Realizando nuevamente un análisis con matlab de los datos de las figuras 10.3 y 10.4, se verifica nuevamente el correcto funcionamiento del sistema como se muestra en la figura 10.5.

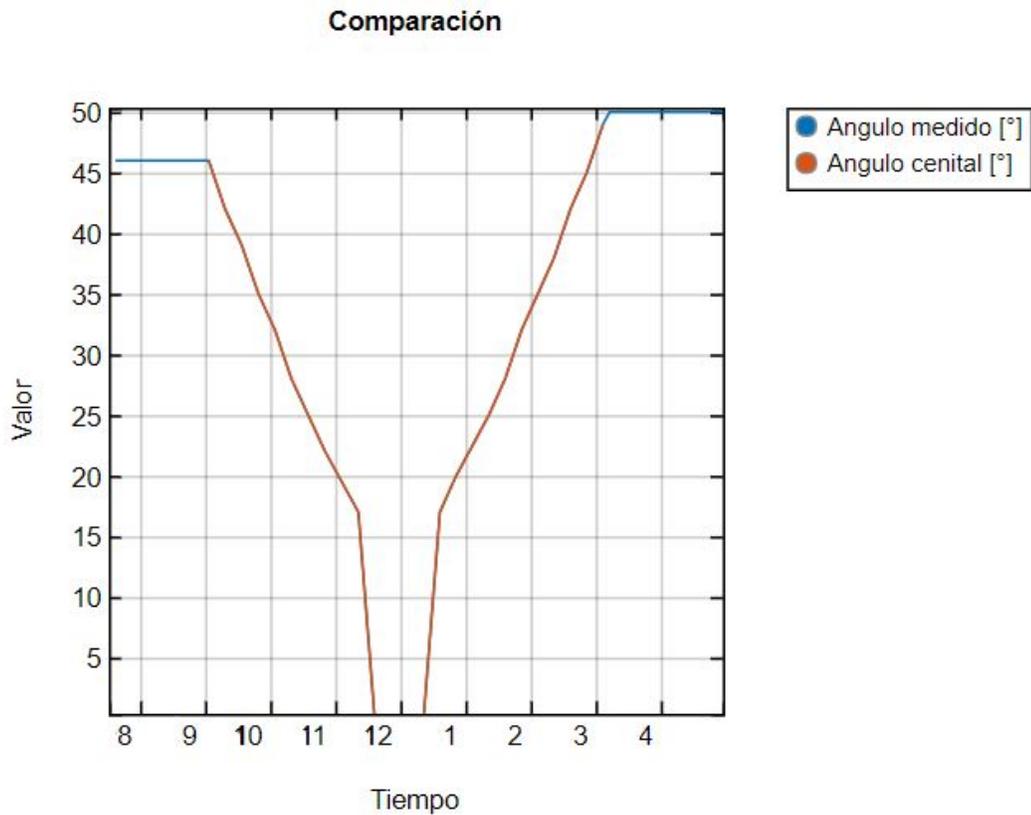


Figura 10.5: Ángulo teórico y experimental para el 17 de noviembre del 2017.

Existen algunos lapsos en los que el módulo WiFi no logra enviar el dato en el momento indicado, algunos de los factores que pueden provocar esto, es la pérdida de la señal ya que el router se encuentra dentro de una edificación y el microcontrolador en la parte externa del edificio, además, existe equipo metálico de por medio. Otro factor que puede alterar el funcionamiento es el tiempo de respuesta de Thingspeak, ya que al ser una versión gratuita presenta ciertas limitantes, además de esto, para establecer la conexión a internet es necesario un tiempo de espera, el cual no puede ser grande ya que el sistema de control requiere un tiempo de respuesta inmediato.

La herramienta easyview de aurora vision, además de mostrar la potencia acumulada por diferentes módulos fotovoltaicos, brinda la opción de visualizar la potencia individual de cada módulo. Las figuras 10.6, 10.7, 10.8 y 10.9 muestran la potencia individual del seguidor y de la estructura con inclinación fija para diferentes días del año.

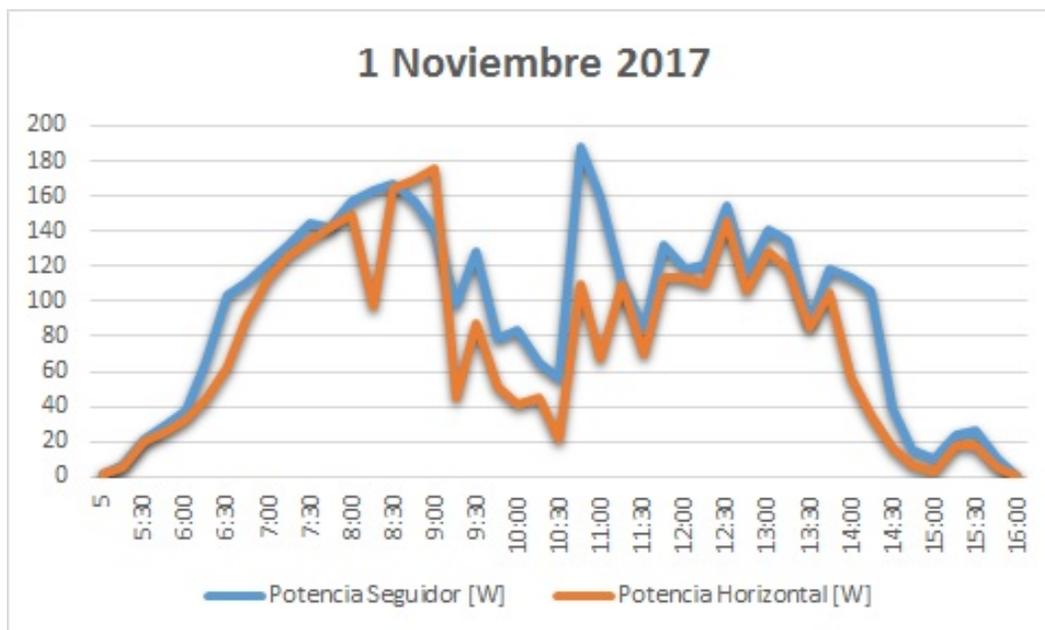


Figura 10.6: Potencia generada por la estructura con seguidor solar vs la estructura fija para el día 305 del 2017.

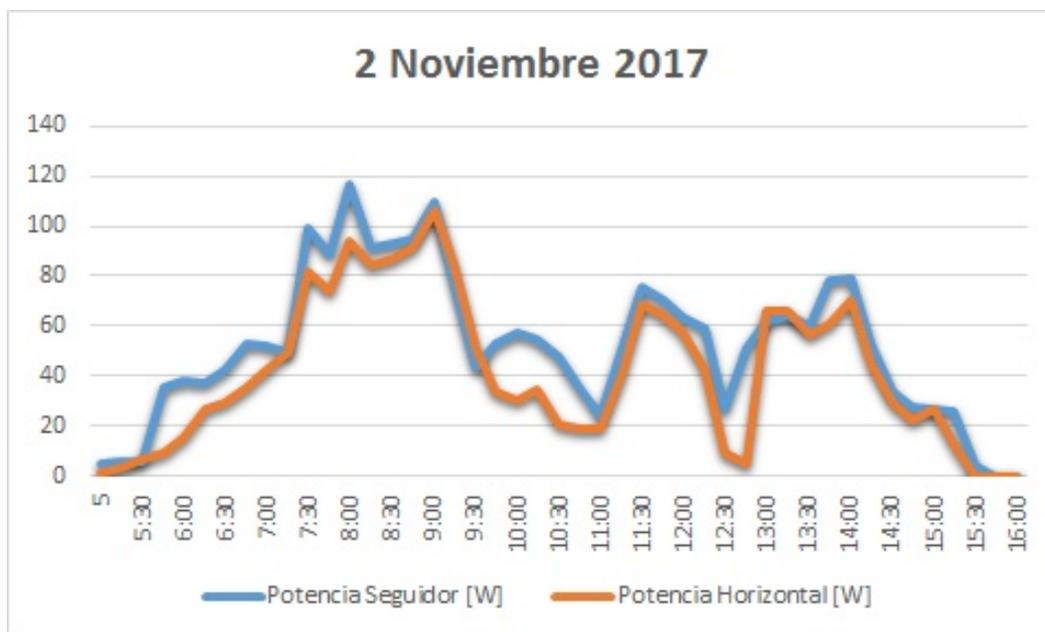


Figura 10.7: Potencia generada por la estructura con seguidor solar vs la estructura fija para el día 306 del 2017.



Figura 10.8: Potencia generada por la estructura con seguidor solar vs la estructura fija para el día 309 del 2017.

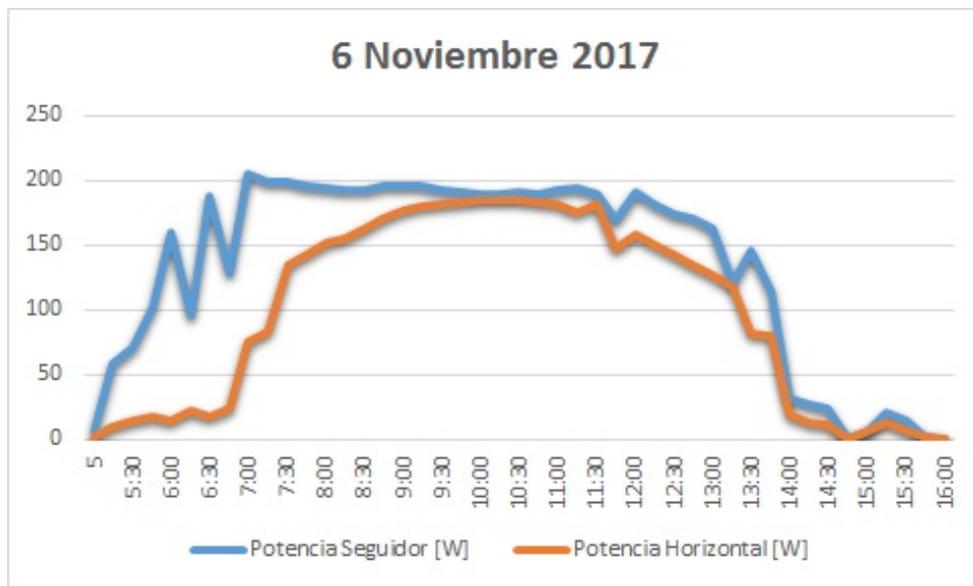


Figura 10.9: Potencia generada por la estructura con seguidor solar vs la estructura fija para el día 310 del 2017.

Existen días en los cuales el incremento de potencia utilizando un seguidor solar es muy alto mientras que para otros días este incremento es relativamente bajo. Existe una serie de factores que pueden alterar los resultados anteriores, uno de ellos es el hecho de que los datos de potencia son enviados en intervalos de 15 minutos, por lo tanto, si en el momento en que el dato es enviado existe una obstrucción entre el sol y la superficie de incidencia, no se tendría un dato certero, ya que instantes anteriores los rayos del Sol podían estar incidiendo sin ninguna obstrucción. Las tablas 10.1, 10.2, 10.3 y 10.4 muestran los valores de las figuras 10.6, 10.7, 10.8 y 10.9, así como la diferencia de potencia entre los valores dados por el seguidor solar respecto a los de la estructura fija.

Potencia [W]			
Hora	Seguidor	Horizontal	Diferencia
5:00	2	2	0
5:15	7	6	1
5:30	22	20	2
5:45	29.5	25.5	4
6:00	38	33	5
6:15	65	44	21
6:30	104	63	41
6:45	111.5	90.5	21
7:00	122	114	8
7:15	132.5	126	6.5
7:30	144	135	9
7:45	142.5	142.5	0
8:00	157	149	8
8:15	163	97.5	65.5
8:30	167	164	3
8:45	157	169	-12
9:00	141	175	-34
9:15	99	45	54
9:30	128	87	41
9:45	79	51	28
10:00	84	41	43
10:15	64.5	45.5	19
10:30	56	22	34
10:45	187.5	109.5	78
11:00	159	67	92
11:15	110.5	110	0.5
11:30	84	70	14
11:45	131.5	114	17.5
12:00	118	114	4
12:15	121.5	110	11.5
12:30	154	146	8
12:45	116.5	106.5	10
13:00	141	129	12
13:15	135	119	16
13:30	88	85	3
13:45	119	104.5	14.5
14:00	113	56	57
14:15	106	35.5	70.5
14:30	39	17	22
14:45	15	7	8
15:00	10	3	7
15:15	24.5	18	6.5
15:30	27	18	9
15:45	10	6	4

Tabla 10.1: Potencia producida por cada módulo para el día 1 de Noviembre del 2017

Potencia [W]			
Hora	Seguidor	Horizontal	Diferencia
5:00	5	1	4
5:15	6	3.5	2.5
5:30	6	7	-1
5:45	35.5	9	26.5
6:00	38	15	23
6:15	37.5	26.5	11
6:30	42	29	13
6:45	53	35.5	17.5
7:00	52	42	10
7:15	49.5	49	0.5
7:30	99	82	17
7:45	88.5	74	14.5
8:00	117	94	23
8:15	91.5	84.5	7
8:30	93	87	6
8:45	94.5	91.5	3
9:00	110	106	4
9:15	77.5	84	-6.5
9:30	43	51	-8
9:45	52.5	33.5	19
10:00	57	30	27
10:15	55	34.5	20.5
10:30	48	21	27
10:45	34.5	19	15.5
11:00	24	19	5
11:15	51	40.5	10.5
11:30	76	69	7
11:45	70.5	64	6.5
12:00	63	57	6
12:15	59	42	17
12:30	27	9	18
12:45	51	4.5	46.5
13:00	62	66	-4
13:15	64.5	66	-1.5
13:30	60	56	4
13:45	78.5	61	17.5
14:00	79	70	9
14:15	52.5	45	7.5
14:30	34	29	5
14:45	27.5	22.5	5
15:00	27	27	0
15:15	25.5	12.5	13
15:30	4	0	4
15:45	0	0	0

Tabla 10.2: Potencia producida por cada módulo para el día 2 de Noviembre del 2017

Potencia [W]			
Hora	Seguidor	Horizontal	Diferencia
5:00	6	2	4
5:15	16.5	7.5	9
5:30	24	12	12
5:45	62.5	13	49.5
6:00	42	7	35
6:15	93.5	6	87.5
6:30	207	8	199
6:45	195	13.5	181.5
7:00	148	49	99
7:15	171	70.5	100.5
7:30	188	126	62
7:45	180.5	129	51.5
8:00	167	124	43
8:15	178.5	143.5	35
8:30	154	124	30
8:45	121.5	100	21.5
9:00	128	112	16
9:15	134	122.5	11.5
9:30	157	146	11
9:45	94.5	86.5	8
10:00	59	57	2
10:15	78.5	70.5	8
10:30	122	111	11
10:45	152	143.5	8.5
11:00	156	139	17
11:15	178	133.5	44.5
11:30	135	118	17
11:45	191.5	172	19.5
12:00	192	173	19
12:15	140	119	21
12:30	147	124	23
12:45	134	106	28
13:00	121	89	32
13:15	122	89.5	32.5
13:30	144	103	41
13:45	162	110.5	51.5
14:00	44	41	3
14:15	44	28	16
14:30	35	20	15
14:45	30	16	14
15:00	27	19	8
15:15	19.5	18	1.5
15:30	4	4	0
15:45	3.5	2.5	1

Tabla 10.3: Potencia producida por cada módulo para el día 5 de Noviembre del 2017

Potencia [W]			
Hora	Seguidor	Horizontal	Diferencia
5:00	7	2	5
5:15	58.5	9.5	49
5:30	71	15	56
5:45	101.5	17.5	84
6:00	159	14	145
6:15	95	22	73
6:30	188	18	170
6:45	129	24	105
7:00	205	75	130
7:15	198.5	83	115.5
7:30	198	134	64
7:45	195.5	142.5	53
8:00	194	151	43
8:15	192.5	155.5	37
8:30	193	162	31
8:45	195	171	24
9:00	196	177	19
9:15	195	180.5	14.5
9:30	192	181	11
9:45	190.5	182.5	8
10:00	190	185	5
10:15	189	185	4
10:30	191	185	6
10:45	190	183	7
11:00	192	182	10
11:15	194	175	19
11:30	189	181	8
11:45	168.5	147.5	21
12:00	191	158	33
12:15	182	150.5	31.5
12:30	174	143	31
12:45	170	135	35
13:00	163	127	36
13:15	120	117.5	2.5
13:30	145	82	63
13:45	115	80	35
14:00	32	19	13
14:15	26.5	13	13.5
14:30	23	11	12
14:45	0	0	0
15:00	7	6	1
15:15	20	12	8
15:30	13.5	6	7.5
15:45	2	1	1

Tabla 10.4: Potencia producida por cada módulo para el día 6 de Noviembre del 2017

Tomando como referencia los resultados anteriores y determinando la potencia generada por ambos módulos a lo largo de día es posible construir una tabla como se muestra a continuación.

Potencia diaria acumulada [W]			
Día	Seguidor	Horizontal	Porcentaje de error [%]
1/11/17	4226.5	3392.5	19.73
2/11/17	2321.5	1869.5	19.47
5/11/17	4909.5	3409	30.56
6/11/17	6041.5	4401.5	27.14

Tabla 10.5: Potencia diaria acumulada

Es posible determinar de manera experimental que para los días en los cuales se realizaron mediciones es posible obtener un 20% extra de potencia para días en los cuales la radiación solar fue un poco baja, es decir, días nublados o lluviosos. Mientras que para los días más despejados se obtiene una ganancia de aproximadamente 30% de potencia al implementar un seguidor solar de un eje.

Tomando en consideración de que la planta del seguidor podría ampliar su capacidad a cuatro paneles solares, un sistema como el del presente proyecto brindaría una producción de potencia de un poco más que cinco paneles solares, es decir, la potencia extraproducida por el seguidor sería la misma que implementar un panel más a un módulo fijo de cuatro paneles solares.

Es posible determinar la energía producida por cada estructura. La tabla 10.6 muestra los resultados de energía.

Energía diaria promedio [kWh]			
Día	Seguidor	Horizontal	Diferencia [%]
1/11/17	1.06	0.85	21
2/11/17	0.58	0.47	11
5/11/17	1.23	0.85	38
6/11/17	1.51	1.10	41

Tabla 10.6: Energía diaria promedio

Capítulo 11

Conclusiones y recomendaciones

11.1 Conclusiones

- Con el sistema de control implementado es posible obtener variaciones de un 1° en el ángulo del sistema aproximadamente cada cinco minutos, con un error menor a 1% respecto al teórico.
- Las perturbaciones provocan alteraciones en el ángulo medido, sin embargo, su error respecto al ángulo de consigna es menor al 1%.
- En caso de un error mayor al 5% el sistema emite una alarma auditiva para alertar al usuario.
- El uso de fórmulas que son simplificaciones o aproximaciones de otras, no brinda un error menor al 5% respecto otras fuentes.
- Si se desea implementar fórmulas sencillas y de pocas variables es posible utilizar las ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3 ya que brindan resultados bastante aproximados a otras fuentes.
- Es posible visualizar en Thingspeak el ángulo de inclinación del sistema en intervalos de 5 minutos o incluso cada 15 segundos como tiempo mínimo, se puede configurar este tiempo desde la programación.
- Con el uso del CDD y micro inversores es posible visualizar la potencia acumulada por ambos módulos fotovoltaicos, así como la potencia individual en intervalos de 15 minutos.
- De manera teórica, es posible determinar que la radiación es un 30% mayor con el uso de un seguidor respecto a una estructura horizontal fija.
- Con la implementación del seguidor existen intervalos del día especialmente en horas de la mañana y parte de la tarde en las cuales la producción de potencia se incrementa incluso en valores de 70%.
- En promedio existe una extra producción de un 30% de potencia diaria con el uso de seguidores solares de un eje.
- En días nublados o lluviosos el uso de seguidores no brinda un gran beneficio por lo que podría apagarse su sistema eléctrico para ahorrar energía.

11.2 Recomendaciones

- Es necesario implementar un sistema de carga para la batería que alimenta el sistema electromecánico ya que su uso no se puede prolongar por más de una semana en caso de usar baterías con mayor capacidad a la utilizada.
- Se debe utilizar un sistema que evite los picos de corriente del motor ya que su movimiento es por lapsos de tiempo muy pequeños, cada cinco minutos, por lo que al activarse consume hasta el doble de corriente de la que consume de manera continua.
- Se recomienda diseñar una estructura con una mayor estabilidad a la actual ya que ante la presencia de perturbaciones es muy inestable, además, si se desea aumentar la cantidad de paneles no sería útil.
- Es necesario realizar un estudio de rentabilidad con el uso de tres a cuatro paneles solares por estructura, ya que el actuador lineal tiene una capacidad de carga de 102kg y cada panel tiene un peso de 18kg.
- El uso de un RTC externo con capacidad de almacenar la hora y fecha es necesario, en caso de que exista un corte en el suministro eléctrico, ya que el RTC interno del microcontrolador se reinicia cuando el microcontrolador se apaga.
- Para obtener un ángulo de medición más estable es necesario el uso de otro tipo de sensor, como lo son los codificadores de cuadratura o potenciómetros, los cuales deben estar sujetos al eje rotatorio y este estar sujeto a la estructura.
- El monitoreo de potencia debe ser en tiempo real, debido a que al ser en lapsos de 15 minutos existen datos que no son tomados en cuenta, los cuales pueden brindar un mejor análisis.

Bibliografía

- [1] Tutiempo, “Angulo de declinación.” Disponible en: <https://www.tutiempo.net/meteorologia/respuestas-10.html>, Respuestas.
- [2] L. Vargas, “Se incrementan las temperaturas en venezuela. ¿por qué ocurre en ésta fecha?.” Disponible en: <http://meteovargas.com/se-incrementan-las-temperaturas-en-venezuela-por-que-ocurre-en-esta-fecha/>, 2015.
- [3] “Perihelio, afelio, y por qué las estaciones, según las mires, van al revés.” Disponible en: <http://www.microservos.com/archivo/ciencia/perihelio-afelio-por-que-las-estaciones-segun-las-mires-van-al-reves.html>, 2013.
- [4] ICE, “Estudio del potencial solar en costa rica.” Disponible en: <http://www.acesolar.org/wp-content/uploads/2016/03/INFORME-FINAL-CONSULTORIA-SOLAR.pdf>, 2006.
- [5] K. L. Méndez, “Energía solar en costa rica.” Disponible en: https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/32d3c6a8-789a-4d56-8416-f7993aa10805/Energia+Solar+en+Costa+Rica+Kenneth+Lobo_2.pdf?MOD=AJPERES.
- [6] J. Solar, “¿monocristalino o policristalino?.” Disponible en: <http://jardin-solar.blogspot.com/2015/03/monocristalino-o-policristalino.html>, 2015.
- [7] J. A. C. Pascual, “La energía solar en México, una energía desaprovechada..” Disponible en: <https://conscienciadespierta.files.wordpress.com/2012/10/sistemaaislado.jpg>.
- [8] V. G. POWER, “Las ventajas de los seguidores solares.” Disponible en: <http://www.valldoreix-gp.com/las-ventajas-de-los-seguidores-solares/>, 2015.
- [9] Carlos, “Redes inalámbricas.” Disponible en: <http://es.ccm.net/contents/818-redes-inalambricas>, 2017.
- [10] cetronic, “Adafruit feather m0 wifi atsamd21 + atwinc1500.” Disponible en: <http://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/producto/DetalleProducto.jsp?idIdioma=idTienda=93codProducto=999334097cPath=1339>.
- [11] U. de Sevilla, “Movimiento oscilatorio.” Disponible en: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Movimiento_oscilatorio, 2010.
- [12] M. Grätzel, “Photovoltaic and photoelectrochemical conversion of solar energy,” *The Royal Society*, vol. 365, p. 993, February 2007.
- [13] Greendipity, “¿cuánto dura un sistema fotovoltaico?.” Disponible en: <https://www.greendipity.co/cuanto-dura-un-sistema-fotovoltaico/>, 2016.

- [14] NASA, “Latitud.” Disponible en: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/dictionary/Latitude.html>, 2015.
- [15] PVEDUCATION, “Angulo de declinación.” Disponible en: <http://www.pveducation.org/es/node/805>.
- [16] C. Meza, “Irradiancia en un día despejado.”
- [17] T. M. B. . A. S. Fernández, “Perihelio y afelio.” Disponible en: <http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/ asignaturas/fisica/dinam1p/sabiasmomang.html>.
- [18] SESLab, “El recurso solar: El sol y las energías renovables,” 2017.
- [19] SESLab, “El recurso solar: ¿cómo se mide la energía irradiada?,” 2017.
- [20] C. O. de Ingenieros de Telecomunicación, “Energía solar fotovoltaica.” Disponible en: <https://www.coit.es/file/4245/download?token=F3kPOsFh>, 2002.
- [21] E. Pascual, “Tipos de paneles solares.” Disponible en: <https://elblogverde.com/tipos-de-paneles-solares/>, 2015.
- [22] T. Energy, “Tipos de sistemas fotovoltaicos.” Disponible en: <http://www.teslaenergy.cl/energia-solar-fotovoltaica/sistemas-fotovoltaicos/>, 2014.
- [23] Ecorresponsabilidad, “Seguidores solares, una seguidores solares, una optimización de la energía solar.” Disponible en: http://www.ecorresponsabilidad.es/pdfs/ecoinnovacion/HISPANOTRACKER_seguidores_solares.pdf.
- [24] J. R. S. . J. V. D. Martínez, “Las redes inalámbricas, más ventajas que desventajas..” Disponible en: <https://www.uv.mx/iiesca/files/2012/12/redes2008-2.pdf>, 2008.
- [25] Aulaclíc, “Artículo 5: Wifi. la comunicación inalámbrica.” Disponible en: <http://www.aulaclíc.es/articulos/wifi.html>, 2005.
- [26] EcuRed, “Tecnología wi-fi.” Disponible en: https://www.ecured.cu/Tecnolog%C3%ADa_Wi-Fi, 2017.
- [27] S. Corporation, “¿qué es la tecnología inalámbrica bluetooth?.” Disponible en: <http://download.sony-europe.com/pub/manuals/html/MDR-1RBT/HG/ES/contents/02/01/01/01.html>, 2012.
- [28] U. Méndez, “Bluetooth, clases y versiones desde v1.0 hasta v5.0.” Disponible en: <https://www.330ohms.com/blogs/blog/que-es-el-bluetooth>, 2017.
- [29] S. R. Vargas, “Desarrollo de un sistema de seguimiento solar diario de un eje para paneles fotovoltaicos,” 2016.
- [30] Adafruit, “Adafruit feather m0 wifi - atsamd21 + atwinc1500.” Disponible en: <https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-m0-wifi-atwinc1500/>.
- [31] Sparkfun, “Analog devices adxl335.” Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/solareqns.PDF>.
- [32] Electronicsblog.net, “Simple angle meter using adxl335 accelerometer [arduino].” Disponible en: <https://www.electronicsblog.net/simple-angle-meter-using-adxl335-accelerometer-arduino/>.

-
- [33] E. Mediavilla, “Programaci3n orientada a objetos.” Disponible en: https://www.ctr.unican.es/asignaturas/mc_oo/doc/m_dinamico.pdf.
- [34] J. U. ANORO, “Tema 1.- sistemas autom3ticos y de control.” Disponible en: <http://ieshuelin.com/huelinwp/download/Tecnologia/Tecnologia%20industrial/3-SISTEMAS-DE-CONTROL-AUTOMaTICO.pdf>, 2010-2011.

Apéndice A

CanadianSolar 250W



CS6P-260 | 265P-SD

Canadian Solar's SmartDC module features an innovative integration of Canadian Solar's module technology and SolarEdge's power optimization for grid-tied PV applications.

By replacing the traditional junction-box with a SolarEdge power optimizer, the SmartDC module optimizes power output at module-level. With this feature, the SmartDC module can eliminate the module-level mismatch and decrease shading losses. Furthermore, the SmartDC module provides module-level data to minimize operational costs and allow effective system management.

Optimized by
solarEdge



* Optional black frame available upon request

KEY FEATURES

- 25%** Harvest up to 25% more energy from each module
 - Maximizes power from each individual module against potential mismatch risk
 - Decreases shading losses

- Easy installation, simple system design**
 - Integrated smart solution, no need to add other accessories
 - Enhances the shading tolerance

- Reduced BoS Costs**
 - Up to 11.25 kW – 12.75 kW per string allows for more modules based on different inverters

- Free module-level monitoring system**
 - Full visibility of system performance
 - Free smart phone app for the monitoring system

- More Safety**
 - Automatic drop of DC current and voltage when inverter or grid power is shutdown

25 years linear power output warranty

10 years product warranty on materials and workmanship

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001:2008 / Quality management system
ISO/TS 16949:2009 / The automotive industry quality management system
ISO 14001:2004 / Standards for environmental management system
OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730: VDE/CE
UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC listed (US)
UL 1703: CSA



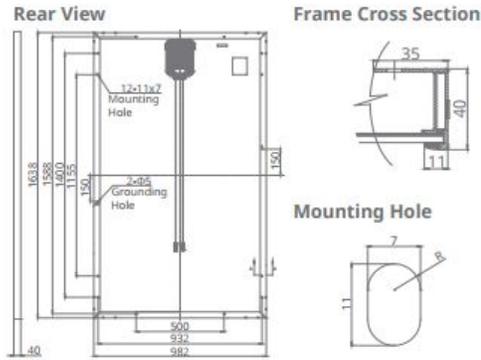
* As there are different certification requirements in different markets, please contact your local Canadian Solar sales representative for the specific certificates applicable to the products in the region in which the products are to be used.

CANADIAN SOLAR INC. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. As a leading manufacturer of solar modules and PV project developer with over 14 GW of premium quality modules deployed around the world since 2001, Canadian Solar Inc. (NASDAQ: CSIQ) is one of the most bankable solar companies worldwide.

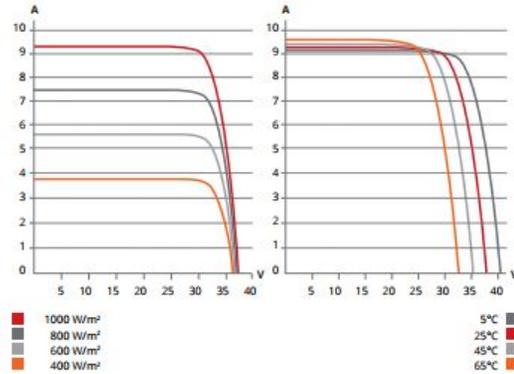
CANADIAN SOLAR INC.

545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS6P-265P-SD / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA / STC*

Power Optimizer connected to a SolarEdge Inverter

CS6P	260P-SD	265P-SD
Nominal Max. Power (Pmax STC)	260 W	265 W
Nominal Max. Power (Pmax NOCT)	189 W	192 W
Open Circuit Voltage (Voc STC)	37.5 V	37.7 V
Output Voltage Range (Vout)	5-60 V	5-60 V
Max. Output Current (Imax)	15 A	15 A
Max. Series Fuse Rating	20 A	20 A
Module Efficiency	16.16 %	16.47 %
Output During Standby (power optimizer disconnected from inverter or inverter off)	1 V	

* Under Standard Test Conditions (STC) of Irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	60 (6x10)
Dimensions	1638x982x40 mm (64.5x38.7x1.57 in)
Weight	19.1 kg
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP65
Cable	PV1-F 1*6.0 mm² / 952 mm
Connectors	MC4
Stand. Packaging	26 pieces, 544 kg (quantity & weight per pallet)
Module Pieces per Container	728 pieces (40' HQ)

PV SYSTEM DESIGN

Min. String Length	EU & APAC	1 ph	8	
		3 ph	16	
	US & Canada	1 ph	8	
		3 ph (208 V)	10	
Max. String Length	EU & APAC	1 ph	20	19
		3 ph	43	42
	US & Canada	1 ph	20	19
		3 ph (208 V)	23	22
Max. Power per String (W)	EU & APAC	1 ph	5250	
		3 ph	11250	
	US & Canada	1 ph	5250	
		3 ph (208 V)	6000	
Parallel Strings of Different Lengths	Yes			
Parallel Strings of Different Orientations	Yes			
Operating Temperature	-40°C – +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC) / 600 V (UL)			
Application Classification	Class A			
Fire Rating	Type 1 (UL1703) / Class C (IEC61730)			
Power Tolerance	0 – +5 W			

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.41 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.31 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.053 % / °C
Nominal Operating Cell Temperature	45±2 °C

STANDARD COMPLIANCE

EMC	FCC Part15 Class B, IEC61000-6-2, IEC61000-6-3
PV Optimizer J-Box	EN50548, UL3730, IEC62109-1 (Class II safety), UL1741
Fire Safety	VDE-AR-E 2100-712:2013-05

PARTNER SECTION



Apéndice B

Windy Nation LIN-ACT1-XX Linear Actuators

windynation
LIN-ACT1-XX Linear Actuators



SPECIFICATION	LIN-ACT1-02	LIN-ACT1-04	LIN-ACT1-06	LIN-ACT1-08	LIN-ACT1-12	LIN-ACT1-16	LIN-ACT1-20	LIN-ACT1-30
Stroke Length	2" (51mm)	4" (102mm)	6" (152mm)	8" (203mm)	12" (305mm)	16" (406mm)	20" (508mm)	30" (762mm)
Rated Load	225 lbs (900N)							
Travel Speed (Max)	0.39 in/sec (10 mm/sec)							
Rated Voltage	12 VDC							
Current Draw (Max)	≤ 2.5 A							
Install Dimension (Min)	Stroke Length + 4.33" (110mm)							
Mounting Holes	0.31" (8mm)							
Limit Switches	Fixed inner (not adjustable)							
Operating Temp	-14.8°F to +149°F (-26°C to +65°C)							
Protection Class	IP65							
Duty Cycle	25%							
Noise Level	≤ 50dB							



INSTALLATION

- WARNING:**
1. The total load on the actuator (structure weight, structure friction, and possible actuator friction) must be less than or equal to the rated load of actuator.
 2. The moving load must be centered above the actuator extension tube so that actuator lifting point is located at the center-of-mass of the structure. Unless the structural design is properly braced, off-centered loads will cause additional friction that can (1) exceed the rated load of the actuator or (2) cause the actuator shaft to bend and permanently fail.
 3. Do not exceed the 25% duty cycle of the actuator. If the actuator is used at full load for 2.5 minutes, then it must remain off for 7.5 minutes. Exceeding the duty cycle will cause the actuator motor to overheat and permanently fail.

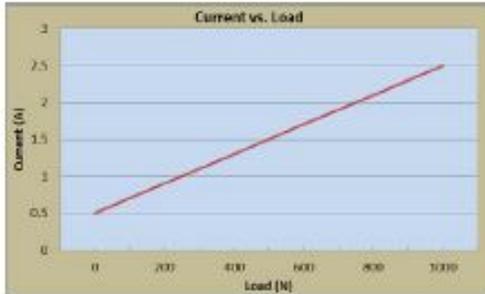
1. Mount the actuator by securing the top and bottom mounting holes to two fixed positions. The stroke length of the actuator (e.g. 12 inches) and the limitations of the particular application will determine the location of the fixed mounting positions.

IMPORTANT: Confirm that up/down movement of the actuator is smooth and within the actuators stroke length after installation.

2. Secure the top and bottom mounting holes of the linear actuator onto the two mounting fixtures using 5/16" diameter bolts.

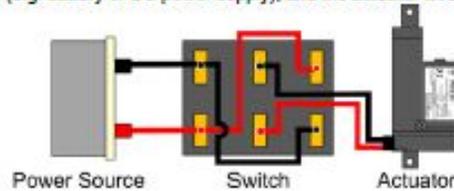
3. Connect the red wire to the positive post and the black wire to the negative post of a 12 volt DC power supply.
4. The operation of the linear actuator should be tested manually after the installation is completed. Users should use caution to ensure that:
 - The travel distance of the actuator satisfies the requirement of the structural design.
 - The extended and retracted limit switches operate normally (The limit switches should stop the motor when the extension tube is fully retracted or fully extended)
 - If the motor runs too slow or does not give full force, (1) the power supply is insufficient and needs to be increased or (2) the load being applied to the actuator is too great and needs to be reduced to less than or equal to 225 lbs.

OPERATION



FORWARD – REVERSE SWITCHING

A double pole-double throw (DPDT) rocker switch can be wired to swap the polarity on the wires going to the motor and control the extension and retraction of the actuator. This is achieved by making the connections between the switch (sold separately), the power source (e.g. battery or DC power supply), and the actuator wires as follows.



TROUBLESHOOTING

Unit will not extend/retract or stops in mid stroke

POSSIBLE CAUSE	CORRECTIVE ACTION
Motor Failure	Use ohmmeter to check resistance of the coil.
Bad Connection	Inspect for broken or loose wires between the power source and the actuator. If a switch is being used check connections between the switch and the actuator/power source.
Thermal Overload Open	If run at a duty cycle greater than 25% or unit is overloaded, the thermal overload in the motor may open to protect the motor. Allow motor to cool and overload to reset. Confirm the application to ensure that the unit is not overloaded and that it is not running at greater than 25% duty cycle.
Insufficient Current	Power may be reaching the motor, but with insufficient current to provide full load moving capacity. Use an amp meter to confirm that sufficient current is reaching the actuator.
Overloaded Clutch Slipping	When a unit is overloaded, the clutch will slip generating a ratcheting noise within the unit. Reduce the load to within specifications and ensure the clutch has not been worn out.

WARRANTY

Windy Nation warrants the item to be free of manufacturing flaws for a period of 90 days.

Windy Nation is not responsible for any injuries and/or damages caused as a result of not complying with the specifications stated.