



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL

ESCUELA DE POSTGRADOS

TRABAJO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGISTER

PRODUCTO FINAL: ARTÍCULO CIENTÍCO

MAESTRÍA:
Telemática, mención Calidad en el Servicio
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:
Telecomunicaciones y Sistemas Informáticos aplicados a la producción y la sociedad
TÍTULO:
Diseño de un prototipo solar fotovoltaico telemétrico para evaluar la eficiencia energética en diferentes condiciones de orientación.
AUTOR(A):
Ing. Carlos Germánico Rivera Liger
TUTOR(A):
PhD. Fidel David Parra Balza

Quito, Ecuador

2019



Yo, Fidel David Parra Balza portador de la C.I. 1757469950 en mi calidad de Tutor del trabajo de investigación titulado:

Diseño de un Prototipo Solar Fotovoltaico Telemétrico para Evaluar la Eficiencia Energética en Diferentes Condiciones de Orientación, elaborado por el Ing. Carlos Germánico Rivera Liger, estudiante de la Maestría en Telemática mención Calidad de servicio de la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL (UISRAEL), para obtener el Título de Magister, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado la tesis de titulación de grado, la apruebo en todas sus partes.

Quito, 30 de agosto de 2019

Firma

PhD. Fidel David Parra Balza

C.I. 1757469950

INTRODUCCIÓN AL TRABAJO DE TITULACIÓN
PROBLEMA PROFESIONAL QUE ABORDA EL ARTÍCULO
Para determinar el ángulo óptimo de inclinación con el fin de lograr la mayor captación de energía solar por los módulos fotovoltaicos es fundamental establecer los movimientos de rotación y traslación de la tierra en el sistema solar. Es bien conocido, que el desplazamiento total de la tierra alrededor del sol tiene una duración de un año sobre una órbita elíptica, y paralelamente rota sobre su propio eje durante un día. También, es fundamental conocer el ángulo de inclinación de la tierra en su eje polar, está definido por 23.45 grados en el plano de su órbita con respecto al sol. Esta inclinación causa que el sol esté más alto en el cielo durante el verano que en el invierno. El ángulo de desviación del sol respecto a la tierra en el plano ecuatorial es llamado declinación (δ). Si el ángulo resulta al Norte de la línea ecuatorial es positivo, si resulta al Sur es negativo. Por esta causa se tiene la pérdida de potencia y como consecuencia una baja eficiencia en los generadores de electricidad fotovoltaicos. Para encontrar una solución a este problema se realizó esta investigación.
OBJETIVO GENERAL QUE SE PERSIGUE CON EL ARTÍCULO
Diseñar un prototipo solar fotovoltaico telemétrico para evaluar la eficiencia energética en diferentes condiciones de orientación.
OBJETIVOS ESPECÍFICOS
• Describir los fundamentos teóricos de los circuitos de control y potencia. • Construir un prototipo solar fotovoltaico telemétrico para realizar las pruebas y mediciones de las variables energéticas. • Implementar el algoritmo de programación del control y transmisión de datos remotos para el seguimiento del punto de máxima potencia con el uso de un microcontrolador y un DAC (convertidor digital a análogo). • Realizar pruebas experimentales que muestren el funcionamiento del sistema para sacar los resultados y conclusiones.
PERTIENENCIA DEL ARTÍCULO:
En la presente investigación se encontró la orientación óptima para captar la máxima energía eléctrica, de esta manera sacar el mayor provecho de este recurso energético limpio y natural en un panel solar fotovoltaico monocristalino de silicio a 10 vatios y 12 VDC. Para ello se diseñó e implementó un prototipo cuya función es monitorear de forma inalámbrica parámetros como la corriente, voltaje y potencia. Además, este prototipo consta de sensores, microcontrolador, transmisor, receptor y una carga variable resistiva electrónica; esta carga ayudó a encontrar las curvas P-V, I-V y puntos de máxima potencia para diferentes condiciones de orientación del panel solar fotovoltaico monocristalino de diez vatios. La visualización y almacenamiento de datos se realizó

por medio de un LCD y a través del software libre Tera Term en el computador, este software realizó la tarea similar a un datalogger. Por último, se dispone del software Matlab para realizar los cálculos, análisis estadísticos y gráficas en el dominio del tiempo. Todos estos puntos y análisis son necesarios para que los paneles se encuentren orientados de forma correcta y proporcionen la máxima potencia posible. Como resultado se encontró que la orientación para que el panel solar trabaje de forma eficiente en la ciudad de Quito es de 0 grados de azimut es decir apuntar hacia el Norte geográfico y con una inclinación de 15 grados con respecto a la horizontal. En estas condiciones se logró captar en aproximadamente un 75% de energía fotovoltaica en un día soleado y condiciones estáticas en comparación con un seguidor solar motorizado.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO INVESTIGATIVO QUE SE REALIZÓ PARA DAR LUGAR AL ARTÍCULO

1. Contextualización del tema en el mundo profesional

En los últimos años la energía renovable ha tomado mucha importancia, esta fuente de energía fotovoltaica es una alternativa eficiente, económica y sustentable la misma que produce un bajo impacto ambiental en comparación a la energía de que proviene de los derivados del petróleo. Para esta última década esta energía es una realidad y no una alternativa.

Los métodos utilizados en la investigación son de tipo explicativo y experimental ya que enmarca cada componente general del sistema FV (Figura 4), descriptivo debido a que menciona cada diseño del prototipo y experimental ya que realiza pruebas de funcionamiento [10]. En la Figura 1 se dispone de un esquema general de la metodología utilizada para alcanzar los objetivos propuestos del prototipo FV, donde primero se realiza una investigación de este tipo de sistemas de energía limpia. Luego se procede a investigar el algoritmo de control y los puntos de máxima potencia. Con estos puntos se elabora el diseño y construcción del prototipo; mediante pruebas experimentales se pueden concluir que tan viable es el prototipo ante diferentes condiciones de orientación.

2. Campo teórico conceptual empleado y principales autores consultados

A nivel mundial la energía renovable se ha convertido en un amplio campo para sustituir la energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles o energía nuclear. Según estudios por la Agencia Internacional de Energía Renovable IRENA menciona que para el año 2018, han disminuido los costos de las tecnologías de generación fotovoltaica de energía renovable y sustentable. Para el caso de la energía eólica y solar fotovoltaica se ha tenido una baja en costos de aproximadamente un 13%, la energía hidroeléctrica con un 12%, por último, el viento geotérmico y en alta mar apenas el uno por ciento [1].

3. Investigaciones previas realizadas

Para realizar la investigación se ha consultado en artículos científicos de gran impacto a nivel mundial como Scopus, Scielo, IEEE, Science, etc. Así como en libros relacionados

con el tema de energía solar fotovoltaica, donde se realizan estudios similares al trabajo realizado en este artículo para tener una idea clara como solucionar el problema planteado en la investigación. A continuación se enumera algunos de los artículos y libros consultados.

- [1] Irena, «International Renewable Energy Agency,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.irena.org/costs>.
- [2] R. Arreola, A. Quevedo, M. Castro, Á. Bravo y D. Reyes, «"Diseño, construcción y evaluación de un sistema de seguimiento solar para un panel fotovoltaico",» 2015.
- [3] M. Solano, «Estado actual de la energía solar fotovoltaica en Latinoamérica y el Caribe,» Olade, Canadá, 2015.
- [4] M. Pacheco, «La matriz energética del Ecuador todavía depende del petróleo,» El comercio, p. 2, 2019.
- [5] ElUniverso, «Periódico de Ecuador,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.eluniverso.com/>.
- [6] CorporaciónEléctricadelEcuador, «Energía Fotovoltaica,» 2016. [En línea]. Available:<https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/retos-empresariales/proyectos-de-generacion-no-convencional/energia-fotovoltaica>. [Último acceso: 14 julio 2019].
- [7] A. Alvarado, «"Análisis, Diseño y Simulación de Sistema Solar Fotovoltaico para suministro eléctrico en apoyo a programa nutricional en la Escuela Rural El Cardonal, Tibaná (Boyacá) - Colombia",» Universidad Libre, Bogotá, 2014.
- [8] Tecnosolab, «Tipos de paneles solares. La elección del panel adecuado.,» 2016. [En línea]. Available: <https://tecnosolab.com/noticias/tipos-de-paneles-solares/>. [Último acceso: 28 julio 2019].
- [9] ConsejoNacionaldeElectricidad, "Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica", Quito., Quito, 2008.
- [10] A. Universia, «Guía para elaborar una tesis,» 2019. [En línea]. [Último acceso: 27 julio 2019].
- [11] Solardat, «Laboratorio de Monitoreo de Radiación Solar,» 2019. [En línea]. Available: <http://solardat.uoregon.edu/index.html>.
- [12] MetroEcuador, «¿Qué es el Equinoccio?,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.metroecuador.com.ec/ec/noticias/2018/03/20/que-es.html>. [Último acceso: 14 julio 2019].
- [13] R. Jácome y I. Suárez, «"Diseño e implementación de un sistema de rastreo solar con dos grados de libertad para la recolección de datos de irradiación global disponible. Estudio de caso para el laboratorio de energías alternativas y eficiencia energética de la EPN",» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2015.
- [14] R. Coughlin y F. Discoll, Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, Mexico: Prentice Hall, 2006.

CONCLUSIONES SOBRE EL PROCESO INVESTIGATIVO Y LOS RESULTADOS LOGRADOS

- El prototipo solar fotovoltaico diseñado e instalado cumplen con las condiciones de voltaje y corriente demostrados mediante los instrumentos Fluke y Tektronic con el propósito de poder determinar el punto máximo de potencia. De manera que los circuitos de control y potencia son eficientes debido a que su error no supera el 4%.
- Los resultados de los datos obtenidos a 15, 60 y 90° de la experimentación con el prototipo en un día completo de sol se tiene como resultado que si instalamos el panel FV con una inclinación de 15° se obtiene la generación de 1952.4 Wh, a 60° la energía se reduce en un 64.79%, y por ultimo a 90° de inclinación solo se puede generar un 7.74% de la energía tomando como referencia la inclinación de 15°.
- De los estudios realizados en el presente trabajo de investigación, se realizaron pruebas a diferentes ángulos de inclinación del panel FV con el objeto de determinar a qué grado posee una alta potencia. Entre ellos se tiene que la mayor potencia obtenida es por un valor de 1.9 kW en una posición a cero grados con respecto a la horizontal. Sin embargo, esta medida no puede ser tomada, ya que el clima no es constante en el año debido a las lluvias, eso puede inundar y dañar el panel fotovoltaico. Por lo tanto, se escoge un ángulo de inclinación de 10 grados para el empleo de la energía eléctrica, obteniendo un valor de 1.83 kW. Por último, si se requiere consumo de energías entre 1 a 1.5 kW aproximadamente, se puede optar por paneles con ángulos de inclinación entre 20 a 50 grados.

Diseño de un prototipo solar fotovoltaico telemétrico para evaluar la eficiencia energética en diferentes condiciones de orientación.

Carlos G. Rivera Liger ¹, Fidel Parra ²

cgrivera76@gmail.com, fparra@uisrael.edu.ec

¹ Docente del Instituto Tecnológico Superior Sucre, Quito, 593, Pichincha, Ecuador.

² Docente de la Universidad Israel, Quito, 593, Pichincha, Ecuador.

Resumen: En la presente investigación se encontró la orientación óptima para captar la máxima energía eléctrica, de esta manera sacar el mayor provecho de este recurso energético limpio y natural en un panel solar fotovoltaico monocristalino de silicio a 10 vatios y 12 VDC. Para ello se diseñó e implementó un prototipo cuya función es monitorear de forma inalámbrica parámetros como la corriente, voltaje y potencia. Además, este prototipo consta de sensores, microcontrolador, transmisor, receptor y una carga variable resistiva electrónica; esta carga ayudó a encontrar las curvas P-V, I-V y puntos de máxima potencia para diferentes condiciones de orientación del panel solar fotovoltaico monocristalino de diez vatios. La visualización y almacenamiento de datos se realizó por medio de un LCD y a través del software libre Tera Term en el computador, este software realizó la tarea similar a un datalogger. Por último, se dispone del software Matlab para realizar los cálculos, análisis estadísticos y gráficas en el dominio del tiempo. Todos estos puntos y análisis son necesarios para que los paneles se encuentren orientados de forma correcta y proporcionen la máxima potencia posible. Como resultado se encontró que la orientación para que el panel solar trabaje de forma eficiente en la ciudad de Quito es de 0 grados de azimuth es decir apuntar hacia el Norte geográfico y con una inclinación de 15 grados con respecto a la horizontal. En estas condiciones se logró captar en aproximadamente un 75% de energía fotovoltaica en un día soleado y condiciones estáticas en comparación con un seguidor solar motorizado.

Palabras-clave: Fotovoltaica; energía; orientación; panel solar; máxima potencia; radiación.

Design of a Telemetric Photovoltaic Solar Prototype to Evaluate Energy Efficiency in Different Orientation Conditions.

Abstract: In the present investigation the optimal orientation was found to capture the maximum electrical energy, in this way to get the most out of this clean and natural energy resource in a monocrystalline silicon photovoltaic solar panel at 10 watts and 12 VDC. For this, a prototype was designed and implemented whose function is to wirelessly monitor parameters such as current, voltage and power. In addition, this prototype consists of sensors, microcontroller, transmitter, receiver and an electronic resistive variable load; this load helped to find the P-V, I-V curves and points of maximum power for different orientation conditions of the ten watt monocrystalline photovoltaic solar panel. The visualization and storage of data was carried out by means of an LCD and through the free Tera Term software on the computer, this software performed the task similar to a datalogger. Finally, Matlab software is available to perform calculations, statistical and graphical analyzes in the time domain. All these points and analysis are necessary so that the panels are oriented correctly and provide the maximum possible power. As a result, it was found that the orientation for the solar panel to work efficiently in the city of Quito is 0 degrees of azimuth, that is, to point towards the geographical North and with an inclination of 15 degrees with respect to the horizontal. Under these conditions it was possible to capture approximately 75% of photovoltaic energy under static conditions compared to a motorized solar tracker.

Keywords: Photovoltaic; energy; orientation; solar panel; maximum power; radiation.

1. Introducción

A nivel mundial la energía renovable se ha convertido en un amplio campo para sustituir la energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles o energía nuclear. Según estudios por la Agencia Internacional de Energía Renovable IRENA menciona que para el año 2018, han disminuido los costos de las tecnologías de generación fotovoltaica de energía renovable y sustentable. Para el caso de la energía eólica y solar fotovoltaica se ha tenido una baja en costos de aproximadamente un 13%, la energía hidroeléctrica con un 12%, por último, el viento geotérmico y en alta mar apenas el uno por ciento [1].

Cabe notar que la energía solar es una de las energías renovables más importantes debido a su sostenibilidad y abundancia. Además, la intermitencia de la luz y energía solar es libre de costo y está ampliamente disponible. Los sistemas fotovoltaicos FV se encargan de generar electricidad proveniente de la luz solar y pueden ser utilizados para el consumo doméstico como: iluminación, sonido, video, equipos eléctricos y electrónicos de baja potencia, produciendo energía limpia [2].

En Latinoamérica y el Caribe algunos países han tenido mayor auge en la instalación de paneles FV, entre ellos están países como Brasil, Cuba, Chile y México. Además, algunos países como Guatemala, El Salvador, Honduras, Panamá, Perú y Uruguay han implementado paneles FV pero en menor escala. Por último, existen países que utilizan los paneles FV para

distintas aplicaciones como Argentina, Barbados, Bolivia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Granada, Haití, Jamaica, República Dominicana y Venezuela, aunque estos países no han tenido mayor producción como el resto de los países anteriormente mencionados [3].

En Ecuador el reemplazo de combustibles fósiles por energía limpia no ha generado mayores resultados, ya que la mayor parte del recurso energético depende del petróleo en un 88%. La Ley de Eficiencia Energética está vigente desde marzo del 2019 a fin de promover e incentivar a personas y empresas el uso de sistemas más limpios en las construcciones y el sector del transporte [4]. Hay que considerar el uso de este tipo energías limpias, ya que el Ecuador está en una buena posición geográfica, como está ubicado en la mitad del mundo la radiación solar es constante en el año [5].

Un ejemplo de la utilización de los paneles solares fotovoltaicos se da en comunidades aisladas en la Amazonía, la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC Termo pichincha dota de este servicio en las zonas rurales de Sucumbíos y Orellana, ya que no cuentan con redes de distribución eléctrica [6]. Otros ejemplos se ven reflejados en el alumbrado público en Cuenca, residencias en la Isla Puná, empresas celulares donde utilizan energía FV en las antenas y la Escuela Politécnica del Litoral ESPOL cuenta con un centro móvil donde la energía FV abastece la iluminación y funcionamiento de las computadoras [5].

Un sistema FV es un equipo que produce energía eléctrica partiendo de la energía solar. Por lo general, el sistema FV consta de un generador solar, regulador de carga, inversor y acumulador [7]. El generador está formado por un conjunto de paneles fotovoltaicos y un dispositivo que transforma dicha energía en corriente continua a bajo voltaje de 12 o 24 voltios, estos pueden ser monocristalinos o policristalina; su diferencia radica en la eficiencia y tiempo de fabricación [8]. La función del regulador de carga es evitar sobrecargas al sistema a fin de que el dispositivo trabaje eficientemente. El acumulador se encarga de almacenar la energía producida por el generador, en este caso suelen utilizar baterías. Por último, se tiene un inversor para convertir la energía continua en alterna, este depende de los dispositivos de carga a ser alimentados [9].

Esta investigación propone el diseño, la construcción y evaluación de un sistema solar fotovoltaico para encontrar la orientación óptima de esta manera obtener un máximo rendimiento energético, el mismo que fue controlado por microcontrolador atmega328p de 8 bits y un panel fotovoltaico de 10 vatios, donde su objetivo es emplearlo en regiones de buena insolación y de bajas temperaturas en la noche.

Para obtener el mejor rendimiento de las radiaciones solares sobre un área específica se puede escoger los siguientes ejes: uno para seguir el sol en la dirección este a oeste y dos ejes donde indica que el sol siempre va en forma directa. De los cuales el sistema de dos ejes es mejor, ya que con este se puede aprovechar al máximo la radiación solar en cualquier instante de

tiempo [2]. Estos resultados indican la factibilidad y ganancia del prototipo en estas condiciones.

El prototipo fotovoltaico contiene circuitos de control, potencia y de comunicaciones. Se emplea una tarjeta de control mediante el microcontrolador Atmega328p, el cual su lenguaje de programación es de código abierto, es decir, permite crear y modificar instrucciones sin necesidad de hacer grandes cambios en el hardware seleccionado. Además, en lo que se refiere a hardware es de bajo costo en comparación con el resto de los dispositivos y equipos. Por último, se debe tener en cuenta el correcto dimensionamiento para conseguir el rendimiento y la complementación esperados.

2. Materiales y métodos

Los métodos utilizados en la investigación son de tipo explicativo y experimental ya que enmarca cada componente general del sistema FV (Figura 4), descriptivo debido a que menciona cada diseño del prototipo y experimental ya que realiza pruebas de funcionamiento [10]. En la Figura 1 se dispone de un esquema general de la metodología utilizada para alcanzar los objetivos propuestos del prototipo FV, donde primero se realiza una investigación de este tipo de sistemas de energía limpia. Luego se procede a investigar el algoritmo de control y los puntos de máxima potencia. Con estos puntos se elabora el diseño y construcción del prototipo; mediante pruebas experimentales se pueden concluir que tan viable es el prototipo ante diferentes condiciones de orientación.

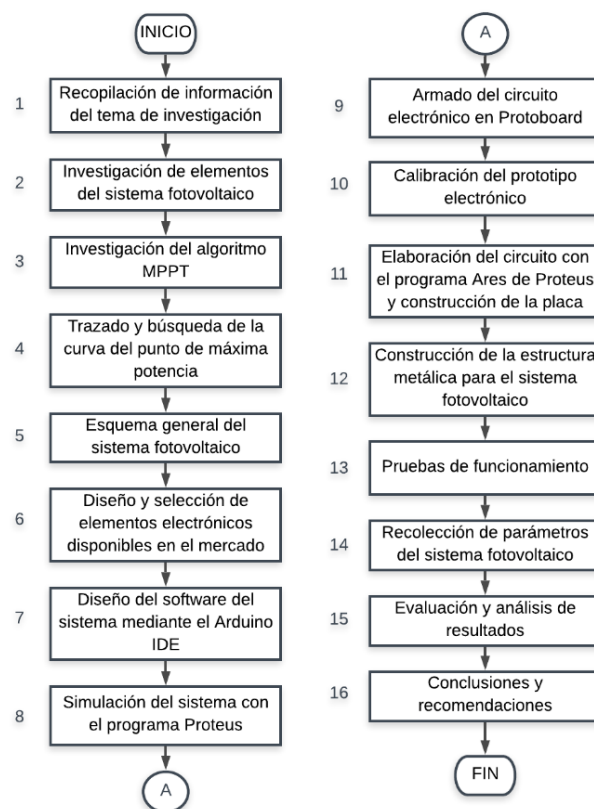


Figura 1 – Esquema general del proyecto de investigación

El prototipo está instalado al sur de la ciudad de Quito – Ecuador, visto en la Figura 2, en el sector de Caupichu de coordenadas latitud -0.331081 y longitud -78.531178 a las 12h00 del 9 de julio del 2019 [11]. En la Figura 3 se observa los valores de la insolación global sobre una superficie horizontal de la energía solar promedio. Dichos datos vienen expresados en vatios-hora por metros cuadrados al día [9]. Cabe notar que para el mes de marzo y septiembre los rayos del sol forma un eje perpendicular con el Ecuador, provocando unos altos índices ultravioletas en horas del mediodía [12]. La carta solar me permite conocer el recorrido diario del sol durante todo el año y me facilitan datos como la hora en que sale y puesta del sol así como los grados de azimut que sale y puesta del sol en los diferentes meses del año. Es importante mencionar que la carta también proporciona información de los solsticios de invierno y verano como también de los equinoccios. En los equinoccios, los rayos del sol son perpendiculares al eje de rotación del planeta tierra y caen verticalmente a la línea ecuatorial. En cambio para los solsticios, el eje de la tierra está inclinado $23,5^\circ$, para este caso los rayos del sol están verticales sobre el trópico de Cáncer lo que significa que es verano en el hemisferio Norte o trópico de Capricornio que sería verano para el hemisferio Sur.

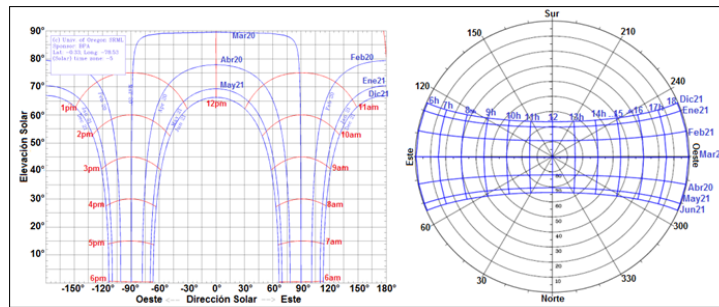


Figura 2 – Carta solar del prototipo

En la figura 3 se tiene una imagen con el mapa solar del sur de la ciudad de Quito el mismo que muestra la radiación solar que recibirá el panel de 10 [w] solar fotovoltaico durante todo el año y este valor es de $2100 \left[\frac{Kwh}{m^2} \right]$ al año, lo que significa que la energía que se podría recibir por cada metro cuadrado de superficie diario en el sector de Quito está en el orden $5.6 \left[\frac{Kwh}{m^2} \right]$. A este valor se debe restar las perdidas por la eficiencia del panel solar fotovoltaico y circuitería electrónica, un valor típicos está en un 20%, lo que se traduce que solo se tendrá $1.12 \left[\frac{Kwh}{m^2} \right]$ de energía eléctrica disponible.

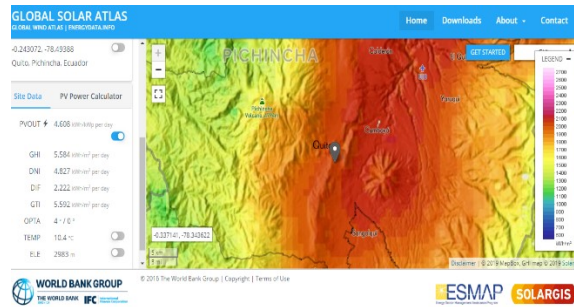


Figura 3 – Atlas global solar en el sector de Caupichu

A continuación se muestra la arquitectura del prototipo FV el mismo que esta formado de un panel fotovoltaico, sensores de voltaje y corriente, un microcontrolador, una carga resistiva, pantalla de visualización directa con LCD 20x4 e interfaces de comunicación [13]. Esta información es enviada mediante radio frecuencia a 915 Mhz y puedan ser almacenados en un computador, como se puede observar en la Figura 4.

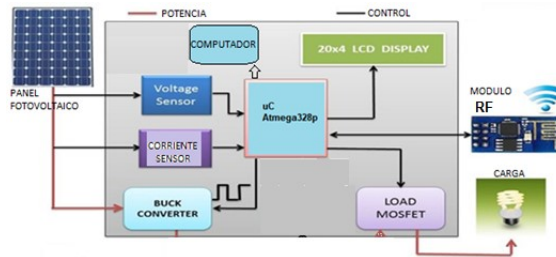


Figura 4 – Diagrama de bloques del prototipo Fotovoltaico.

Las mediciones de voltaje y corriente ayudan a determinar el punto de máxima potencia en función del grado de inclinación del panel fotovoltaico en las horas de sol. En la Figura 5 se tiene un sensor de voltaje compuesto de un circuito electrónico basado en amplificadores operacionales de instrumentación y un divisor de tensión formado por dos resistencias, seguidor de señal y un filtro para mejorar el factor de rizado de la componente de voltaje de continua, atenuación del voltaje medio y no causar daño a la entrada del conversor análogo digital del microcontrolador utilizado.

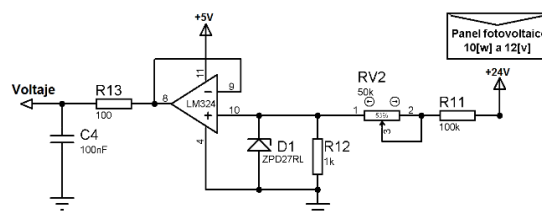


Figura 5 – Sensor de voltaje

En la Figura 6 se dispone de un sensor de corriente formado de una serie de dispositivos como una resistencia de potencia de 0.05 ohmios que ayuda a convertir la corriente en voltaje medido, ese valor es ingresado a un amplificador de voltaje LM324 con salida positiva y al igual que el sensor de voltaje, la señal es atenuada con un filtro resistivo capacitivo.

[illegible]

Figura 7 – Diagrama del microcontrolador

The circuit diagram shows a 1-wire interface. On the left, an MCP4725 DAC (U3) is connected to a 5V supply and ground. Its SCL pin is connected to pin 5, SDA to pin 4, VDD to pin 1, and VSS to pin 2. The DAC's VOUT pin (pin 1) is connected to the non-inverting input (pin 5) of an LM324 op-amp (U1). The op-amp is configured as a voltage follower, with its output (pin 7) connected back to its inverting input (pin 6). The op-amp is powered by a 5V supply (pin 1) and ground (pin 4). A 20k resistor (R1) connects the op-amp's output to the gate of an IRF244Z MOSFET (Q1). The MOSFET's source is connected to ground through a 330Ω resistor (R3) and a 100nF capacitor (C1). The MOSFET's drain is connected to a +24V supply through a 1k resistor (R2) and a 1nF capacitor (C2). The MOSFET's gate is also connected to ground through a 10k resistor (R6). The MOSFET's drain is connected to a 100Ω resistor (R4) and a 15Ω resistor (R5) in series with ground. The MOSFET's gate is also connected to a 100Ω resistor (R4) and a 15Ω resistor (R5) in series with ground. The MOSFET's gate is also connected to a 100Ω resistor (R4) and a 15Ω resistor (R5) in series with ground.

Figura 8 – Manejo de la carga variable conectada al panel fotovoltaico

11

rizado del 0.1%, tal como se indica en la Figura 9 [16]. Adicional se colocan capacitores que sirven como filtros para atenuar la señal de entrada y salida del voltaje continuo. En la Figura 10 se observa una pantalla de visualización del voltaje, corriente, potencia y eficiencia.

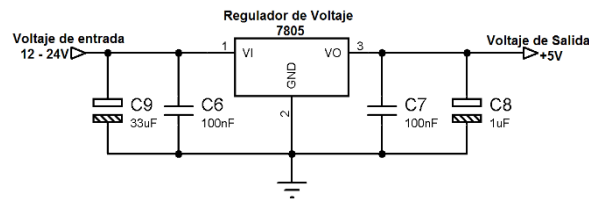


Figura 9 – Fuente de Alimentación

Para visualizar las variable energéticas medidas por el prototipo que para este caso son la corriente, el voltaje, la potencia y energía se utilizó un display de cristal liquid0 de cuatro filas por 20 caracteres cada una, el cual se comunicara con el microcontrolador mediante una comunicación I2C para la transmisión de la información y de esta forma se utilizó menos recursos del microcontrolador optimizando la transmisión de la información. Se utilizó este LDC por motivos de consumo de energía, tiempo de respuesta y con la finalidad de mostrar caracteres alfanuméricos.

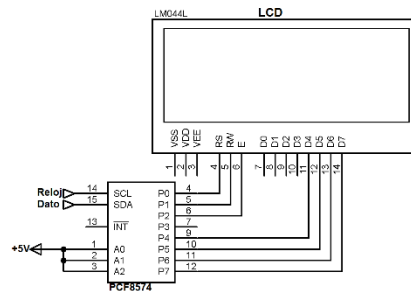


Figura 10 – Visualización de parámetros

Por último, se emplea un sistema de transmisión de datos telemétrico 3DR inalámbricos de 1.5 Km de cobertura, los mismos fueron utilizados como transmisor y receptor respectivamente, dentro de la banda de 915 MHz, 27 dbm (500mw) y 3.7 voltios para las condiciones de radiación y temperatura en que se realizó la medición. En la Figura 11 se observa el prototipo instalado.



Figura 11 – Prototipo armado

3. Resultados y discusión

En un inicio se realiza la simulación del circuito electrónico mediante el programa Proteus, visto en la Figura 12. Esta simulación funciona con el uso de un hipertextual en los pines Rx y Tx seriales del microcontrolador Atmega328P. Como se logra observar en la Figura, muestra la misma cadena de datos en el software Tera Term.

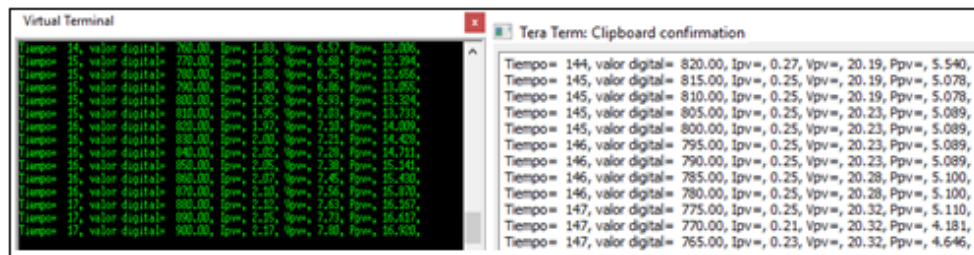


Figura 12 – Simulación del circuito de control en el programa Proteus

Una vez realizada la simulación, se procede al armado del circuito electrónico y se realizan las pruebas de funcionamiento. Se utiliza el método indirecto para realizar mediciones tipo patrón en la calibración del sistema FV, para ello se utilizan los instrumentos de marca Fluke y Tektronic para realizar mediciones, tal como se indica en la Figura 13. En la figura se puede observar que la corriente y voltaje medido con el prototipo es de 41mA y 11.92 V respectivamante, se compara con los datos medidos con los instrumentos certificados que es de 39.4 mA y 11.8 V. De los valores antes mencionados se puede decir que practicamente son los mismos y el error por medicion tiende a cero.



Figura 13 – Instrumentos Fluke y Tektronic

Cabe mencionar que los equipos de medición e instrumentación utilizados para la calibración y toma de datos de la tarjeta electrónica son confiables y certificados mediante normas internacionales. En la Tabla 1 se indica los errores absoluto y relativo para ciertos rangos de voltaje medidos y diseñados. Es importante mencionar que el error absoluto y relativo del instrumento voltímetro diseñado tiene un valor muy pequeño lo que significa que esta dentro de los requisitos y tolerancia considerados en el diseño.

Tabla 1 - Resultados del error de la calibración del voltímetro.

Mediciones	Voltaje V		Errores	
	Fluke	Diseño	Absoluto	Relativo %
1	1.0	0.99	-0.01	-1.0
2	2.5	2.51	0.01	0.4
3	5.0	4.8	-0.2	-4.0
4	7.5	7.52	0.02	0.3
5	10.0	9.98	-0.02	-0.2
6	12.5	12.7	0.2	1.6
7	15.0	15.25	0.25	1.7
8	17.5	17.4	-0.1	-0.6
9	20.0	20.06	0.06	0.3
10	22.5	22.52	0.02	0.1
11	25.0	25.5	0.5	2.0

En la figura 14 se observa las curvas medidas por el voltímetro de marca Fluke (color azul) como con el voltímetro diseñado para el prototipo (color rojo). La figura, muestra que se han realizado 11 mediciones tanto con el voltímetro diseñado como con el voltímetro Fluke, las mediciones inicia en 0 y termina en 25 voltios puesto que este es el rango de trabajo del panel fotovoltaico. Con ello se ha logrado que las dos curvas esten alineadas una sobre la otra lo que significa que los dos voltímetros marcan igual.

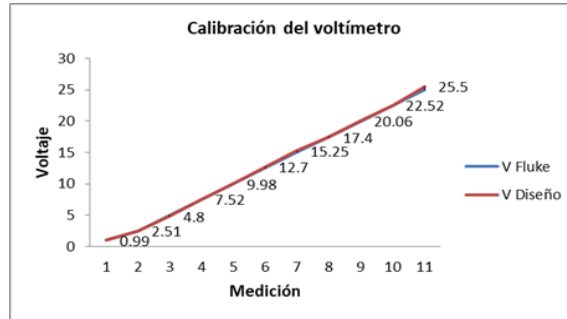


Figura 14 - Curva de calibración del voltímetro diseñado e implementado

En cambio, la Figura 15 muestra la curva del sensor de corriente que circula por la carga electronica conectada al panel fotovoltaico, en base a la toma de carga realizada, visto en el circuito electrónico (Figura 6). Como se observa, la salida del circuito implementado posee una salida de tipo lineal. Para la construcción del instrumento amperímetro se utilizó amplificadores operacionales de instrumentación ya que las corrientes que se midieron son en el orden de las miliamperios y necesitan que tenga una buena precisión.

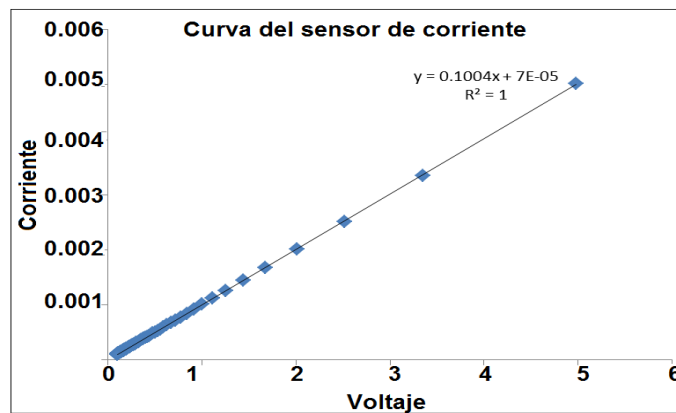


Figura 15 – Curva de la respuesta del sensor de corriente.

A partir de mediciones experimentales, es posible determinar el valor de voltaje, corriente y por tanto la potencia desarrollada por un panel fotovoltaico para un determinado ángulo de inclinación del panel solar fotovoltaico de 10 vatios. Mediante el uso de Matlab se realizan cálculos y análisis del prototipo implementado, es decir, se indican las curvas potencia – voltaje, corriente – voltaje y potencia – tiempo, tal como se indican en la Figura 16 y Tabla 2.

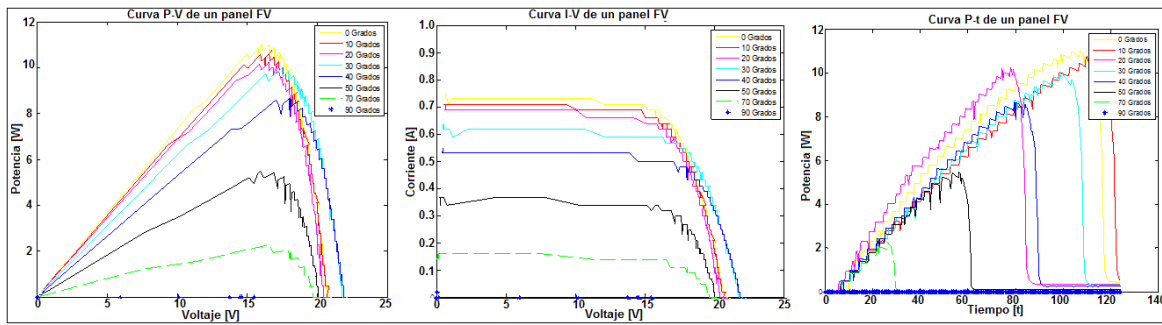


Figura 16 – Curvas del panel solar FV en Matlab

Para determinar el ángulo de inclinación y azimut optimo se procede a tomar medidas con el uso del prototipo a determinadas horas del día esto es: 7h00, 9h00, 12h00, 15h00 y 17h00. Esto se lo realiza a diferentes ángulos de inclinación, que para este caso de la investigación se lo realiza a 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70 y 90 grados de inclinación respecto a la horizontal, el tiempo que toma realizar las pruebas en aproximadamente un mes . Como resultado se obtiene las curvas de la figura 17, en esta se puede observar que la fig17-a la máxima potencia se tiene en la curva de color amarillo en la cual se tiene 2.5 vatios que le corresponde a 0° y con un azimut de 0° que significa que el panel fotovoltaico está apuntando hacia el norte geográfico. Es importante mencionar que para encontrar el ángulo de azimut o sea la dirección del panel fotovoltaico en la coordenadas geográficas norte, sur, este y oeste, se utiliza las coordenadas del sitio en formato de longitud y latitud del lugar donde se instalara el sistema solar, para con estos datos ingresar a la página web de la universidad de Oregón para encontrar la carta solar que me indica el recorrido del sol durante todo el año en el sitio de la instalación. En las investigaciones realizadas indican que si la instalación se lo realiza en el hemisferio norte el panel se tiene que apuntar hacia el sur y si se encuentra en el hemisferio sur se tendrá que apuntar al norte geográfico. Como resultado de estas graficas se puede indicar que para que el sistema sea lo más eficiente y captar la máxima energía solar se tiene que ubicar a 15° de inclinación y apuntar hacia el norte.

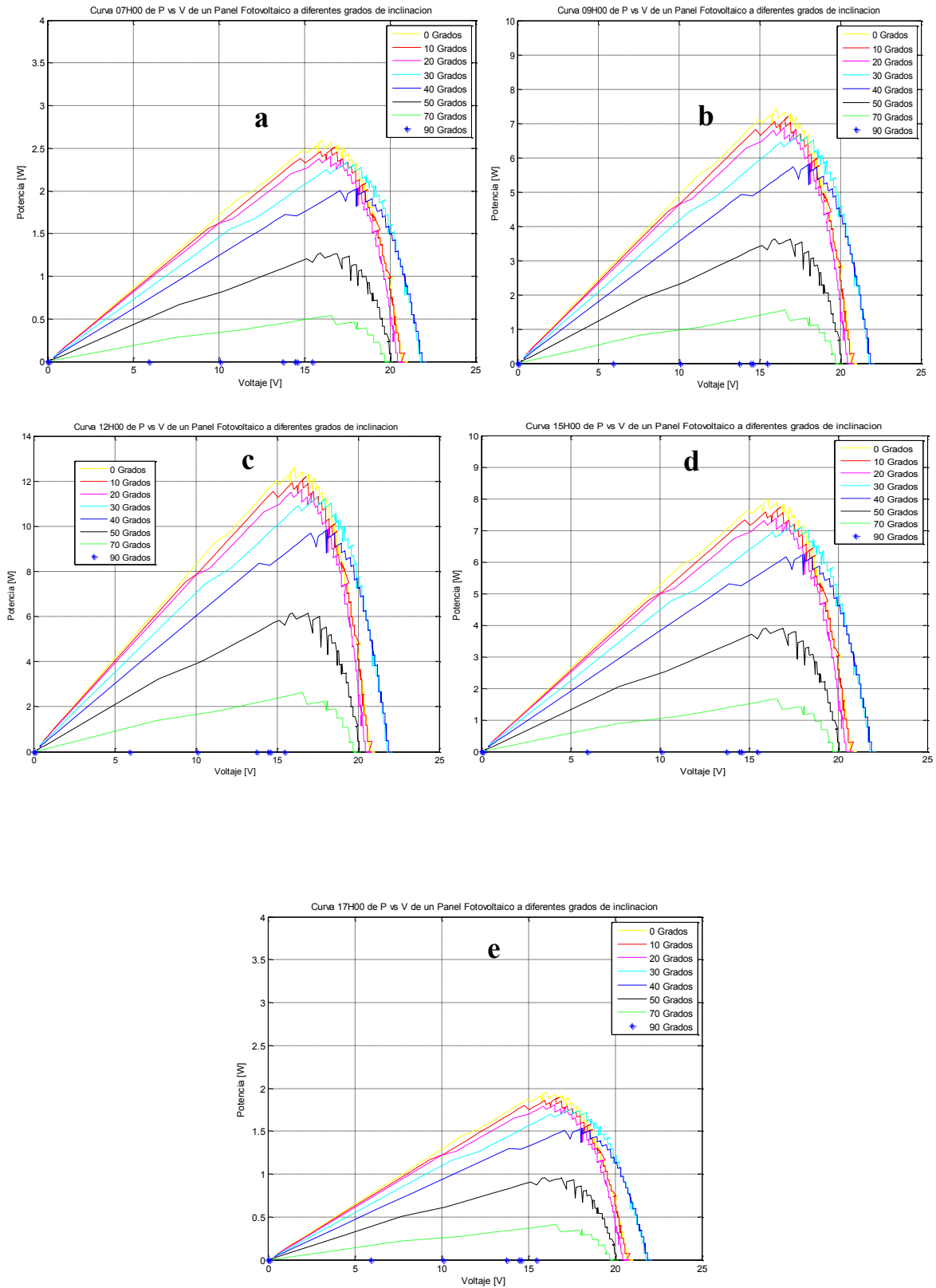


Figura 17 – Curvas de potencia del panel solar FV de 10 vatios a diferentes horas del día y diferentes ángulos de inclinación con respecto a la horizontal en el software Matlab, **a.-** para las 7h00, **b.-** 9h00, **c.-** 12h00, **d.-** 15h00 y **e.-** 17h00.

En la tabla 2 se puede apreciar en la primera columna los grados de inclinación del panel solar fotovoltaico en un rango de 0 a 90 grados, la segunda columna muestra la sumatoria de potencias instantáneas para las diferentes inclinaciones del PV, la siguiente columna está el tiempo de 124 segundos que dura la prueba con esa condición de inclinación y por ultimo para encontrar la energía almacenada del sistema en Kilojulios se multiplica la potencia por el tiempo, como resultado se tiene que para cero grados se obtiene la máxima energía de 236.2 [Kjulios].

Tabla 2 – Potencia y Energía del panel FV en función del ángulo de inclinación

Grados [°]	Potencia [W]	Tiempo [s]	Energía [J]	Energía [KJ]
0	1904.7	124.0	236188.6	236.2
10	1825.3	124.0	226332.4	226.3
20	1505.9	124.0	186728.5	186.7
30	1215.1	124.0	150675.1	150.7
40	1071.3	124.0	132840.0	132.8
50	451.3	124.0	55956.9	56.0
70	81.3	124.0	10080.0	10.1
90	0.0	124.0	0.0	0.0

Una vez obtenidos las curvas para el panel FV, se realiza un histograma con el propósito de poder interpretar mejor la variación de energía donde se tiene que a 0° el panel produce una energía de 236.2 julios, al inclinar levemente 10° esta energía se reduce en un 4.19% y así va disminuyendo hasta tener una producción de energía de 0 julios a 90° de inclinación con respecto a la horizontal, como se puede observar en la figura 18.

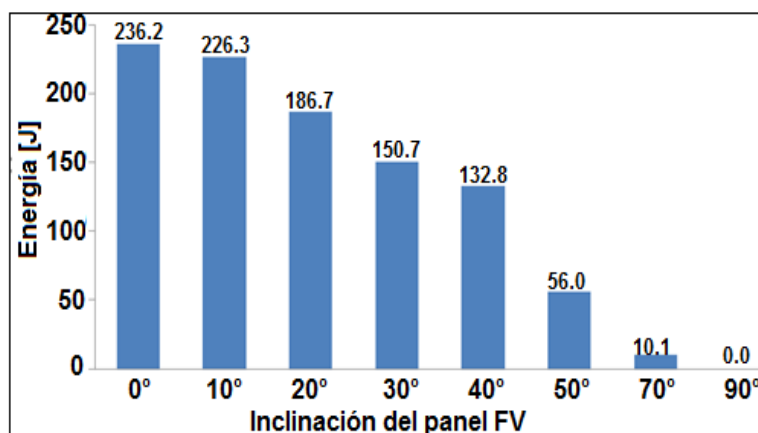


Figura 18 – Histograma de la inclinación del panel FV en función de la Energía

En la figura 19 se puede apreciar que con los datos obtenidos a 15, 60 y 90° de la experimentación con el prototipo en un día completo se tiene como resultado, que si instalamos el panel FV con una inclinación de 15° se obtiene la curva de color azul con una

generación de 1952.4 Wh, 60° color naranja la energía se reduce en un 64.79%, y por ultimo a 90° de inclinación color gris solo se puede generar un 7.74% de la energía tomando como referencia la inclinación de 15°. Ver figura 19

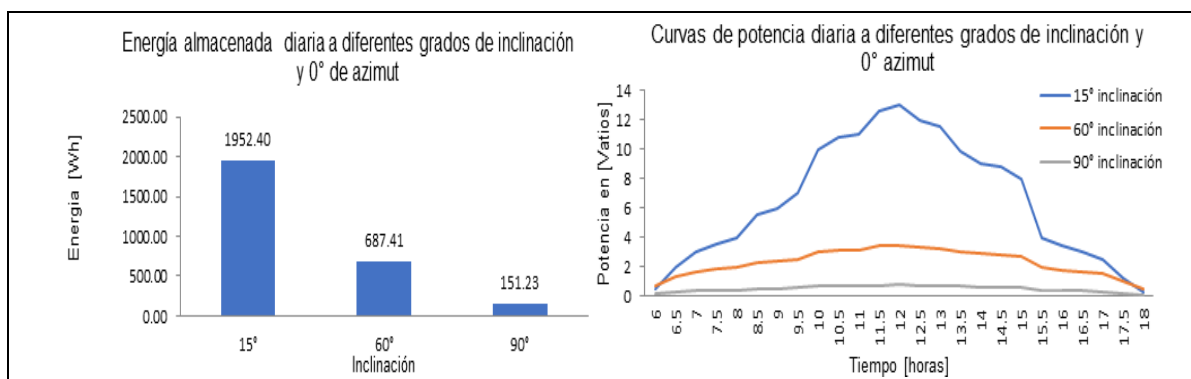


Figura 19 – Energía almacenada en la batería del prototipo en un día de sol con diferentes ángulos de inclinación.

4. Conclusiones

El prototipo solar fotovoltaico diseñado e instalado cumple con las condiciones de voltaje y corriente demostrados mediante los instrumentos Fluke y Tektronic con el propósito de poder determinar el punto máximo de potencia. De manera que los circuitos de control y potencia son eficientes debido a que su error no supera el 4%.

Los resultados de los datos obtenidos a 15, 60 y 90° de la experimentación con el prototipo en un día completo de sol se tiene como resultado que si instalamos el panel FV con una inclinación de 15° se obtiene la generación de 1952.4 Wh, a 60° la energía se reduce en un 64.79%, y por ultimo a 90° de inclinación solo se puede generar un 7.74% de la energía tomando como referencia la inclinación de 15°.

De los estudios realizados en el presente trabajo de investigación, se realizaron pruebas a diferentes ángulos de inclinación del panel FV con el objeto de determinar a que grado posee una alta potencia. Entre ellos se tiene que la mayor potencia obtenida es por un valor de 1.9 kW en una posición a cero grados con respecto a la horizontal. Sin embargo, esta medida no puede ser tomada, ya que el clima no es constante en el año debido a las lluvias, eso puede inundar y dañar el panel fotovoltaico. Por lo tanto, se escoge un ángulo de inclinación de 10 grados para el empleo de la energía eléctrica, obteniendo un valor de 1.83 kW. Por último, si se requiere consumo de energías entre 1 a 1.5 kW aproximadamente, se puede optar por paneles con ángulos de inclinación entre 20 a 50 grados.

5. Referencias bibliográficas

- [1] Irena, «International Renewable Energy Agency,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.irena.org/costs>.
- [2] R. Arreola, A. Quevedo, M. Castro, Á. Bravo y D. Reyes, «"Diseño, construcción y evaluación de un sistema de seguimiento solar para un panel fotovoltaico",» 2015.
- [3] M. Solano, «Estado actual de la energía solar fotovoltaica en Latinoamérica y el Caribe,» Olade, Canadá, 2015.
- [4] M. Pacheco, «La matriz energética del Ecuador todavía depende del petróleo,» *El comercio*, p. 2, 2019.
- [5] ElUniverso, «Periódico de Ecuador,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.eluniverso.com/>.
- [6] CorporaciónEléctricadelEcuador, «Energía Fotovoltaica,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/retos-empresariales/proyectos-de-generacion-no-convencional/energia-fotovoltaica>. [Último acceso: 14 julio 2019].
- [7] A. Alvarado, «"Análisis, Diseño y Simulación de Sistema Solar Fotovoltaico para suministro eléctrico en apoyo a programa nutricional en la Escuela Rural El Cardonal, Tibaná (Boyacá) - Colombia",» Universidad Libre, Bogotá, 2014.
- [8] Tecnosolab, «Tipos de paneles solares. La elección del panel adecuado.,» 2016. [En línea]. Available: <https://tecnosolab.com/noticias/tipos-de-paneles-solares/>. [Último acceso: 28 julio 2019].
- [9] ConsejoNacionaldeElectricidad, "Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica", Quito., Quito, 2008.
- [10] A. Universia, «Guía para elaborar una tesis,» 2019. [En línea]. [Último acceso: 27 julio 2019].
- [11] Solardat, «Laboratorio de Monitoreo de Radiación Solar,» 2019. [En línea]. Available: <http://solardat.uoregon.edu/index.html>.
- [12] MetroEcuador, «¿Qué es el Equinoccio?,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.metroecuador.com.ec/ec/noticias/2018/03/20/que-es.html>. [Último acceso: 14 julio 2019].
- [13] R. Jácome y I. Suárez, «"Diseño e implementación de un sistema de rastreo solar con dos grados de libertad para la recolección de datos de irradiación global disponible. Estudio de caso para el laboratorio de energías alternativas y eficiencia energética de la EPN",» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2015.
- [14] R. Coughlin y F. Discoll, *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*, Mexico: Prentice Hall, 2006.
- [15] Arduino, «¿Qué es Arduino?,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [16] Alldatasheet, «Búsqueda de hoja de datos de componentes electrónicos,» [En línea]. Available: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=LM324&gclid=CjoKCQjwj_XpBRCCARIsAltJiuTMYnRHkMpD2Ee-Z_QjOlAWoS-7kMV1EUUpJoCfdrtXlwGt8K3zJRlAp1kEALw_wcB. [Último acceso: 27 julio 2019].

