



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:

“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO PARA EL ANÁLISIS DE
LA TRAYECTORIA SOLAR EN PANELES FOTOVOLTAICOS.”

AUTORES:

NIETO VERA GUILLERMO ANTONIO

RAMOS MOROCHO DANIEL ALBERTO

TUTOR:

DR. LATA GARCIA JUAN CARLOS

GUAYAQUIL - ECUADOR

MARZO 2021

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

.....

DIRECTOR DE CARRERA
INGENIERÍA ELÉCTRICA

.....

DIRECTOR DE PROYECTO
TITULACIÓN

.....

VOCAL

.....

VOCAL

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Nieto Vera Guillermo Antonio y Ramos Morocho Daniel Alberto autorizamos a la **Universidad Politécnica Salesiana** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, 1 de marzo, 2021



Nieto Vera Guillermo Antonio

C.I.: 0930252978



Ramos Morocho Daniel Alberto

C.I.: 0704564541

CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

Yo, **Nieto Vera Guillermo Antonio**, con documento de identificación N° **0930252978**, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO PARA EL ANÁLISIS DE LA TRAYECTORIA SOLAR EN PANELES FOTOVOLTAICOS**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 1 de marzo, 2021



Nieto Vera Guillermo Antonio

C.I.: 0930252978

CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

Yo, **Ramos Morocho Daniel Alberto**, con documento de identificación N° **0704564541**, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO PARA EL ANÁLISIS DE LA TRAYECTORIA SOLAR EN PANELES FOTOVOLTAICOS**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 1 de marzo, 2021



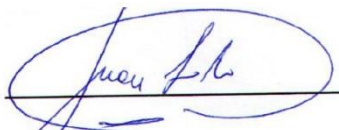
Ramos Morocho Daniel Alberto

C.I.: 0704564541

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR

Yo, **JUAN CARLOS LATA GARCIA**, director del proyecto de Titulación denominado **“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO PARA EL ANÁLISIS DE LA TRAYECTORIA SOLAR EN PANELES FOTOVOLTAICOS.”** realizado por los estudiantes, Nieto Vera Guillermo Antonio y Ramos Morocho Daniel Alberto, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, 1 de marzo, 2021



Ing. Juan Carlos Lata García, PhD

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedicó principalmente a Dios, quien es el que me ha dado la fortaleza para superarme.

A mis padres, por el amor, trabajo y sacrificio reflejan la dedicación que han invertido durante todos estos años, he sido el orgullo y privilegio de ser su hijo, son los mejores padres.

A mis hermanos, por estar presentes, por ese apoyo moral que me brindaron, y a mi compañera e hija, ellas han iluminado mi vida con su apoyo en alcanzar mis metas y me dan fuerzas para seguir adelante.

Guillermo Nieto

En primer lugar dedico el presente trabajo de titulación a Dios, por la salud, bendiciones y sobre todo la sabiduría que me ha regalado.

A mis amados padres, Ángel y Laura, pilares fundamentales en mi vida, me han brindado todo su amor, dirección y apoyo incondicional en cada momento, fruto de ello verme culminar mis estudios universitarios. A mis hermanos que con su cariño y ánimos han sido un apoyo fundamental para lograr alcanzar mis metas.

Daniel Ramos

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por bendecirme con la vida y darme su dirección. Gracias a mis padres, por ser el principal motor de mis sueños, por creer en mí, por sus sabios consejos, valores y principios. A mis hermanos por llenar mi vida de alegría y por su apoyo, también a Gabriela y Amy, por ser quienes me motivan a ser una mejor persona día tras día.

Gracias a nuestro tutor, Dr. Juan Lata, por compartir sus conocimientos y lograr culminar este trabajo de titulación. Agradezco también a la Universidad Politécnica Salesiana por facilitar aquellos conocimientos compartidos con sus docentes.

Guillermo Nieto

Gracias Dios por tu gracia y bondad, por cada una de las bendiciones que has derramado en toda esta etapa de mi vida, gracias a tu ayuda permites que logre todos mis éxitos, y cuando decaigo tu estas ahí siempre para darme la mano y levantarme. Cada prueba que pones en el camino sirven para mejorar como humano e hijo y pueda superarme de maneras que solo tu conoces.

Gracias a Dios por tener unos padres que me han sabido guiar durante toda mi vida por el bien, por darme aquellos consejos que sin duda alguna han reflejado cada etapa de poder llegar a ser alguien en este mundo, ellos son los promotores de todo este proceso. A mis hermanos y amigos que de algún modo también aportaron una parte de ellos en todo este tiempo.

Gracias al Dr. Juan Lata García, que con su apoyo y orientación he podido culminar el presente trabajo de titulación, también a cada uno de los docentes que pude conocer, gracias por sus enseñanzas que de algún modo las he puesto en práctica.

Y a la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, por proporcionarme aquellas herramientas que me harán defender en el campo profesional.

Daniel Ramos

RESUMEN

En la actualidad el consumo de energía eléctrica ha tenido importante incremento sin embargo las reservas de petróleo han disminuido, cambios importantes en los precios de los combustibles y un notable impacto ambiental debido a las emisiones de gases contaminantes procedente de los combustibles fósiles han dado lugar al crecimiento de las energías limpias como la solar fotovoltaica. Lograr obtener la mayor eficiencia generada por los paneles solares es una tarea que está en estudio buscando técnicas para encontrar la inclinación y orientación óptima evitando las pérdidas por sombras para todo el año de funcionamiento.

En el presente documento se realiza el diseño y la implementación de un módulo para el complemento en el análisis del ángulo óptimo y del mapa de trayectoria por sombreados en un sistema fotovoltaico para aplicaciones de energía solar. El ángulo óptimo para superficies inclinadas varía de 0° a 30° en pasos de 5° se calculó y simuló mediante el software Pvsyst donde se buscó el máximo valor de la radiación solar total diaria en un periodo específico. Se encontró que el ángulo de inclinación óptimo cambiaba entre 0° y 10° durante todo el año en las instalaciones del al UPS sin tener porcentaje de pérdidas, a pesar de ello el ángulo de inclinación óptimo se alcanzó a los 5° la radiación total diaria promedio mensual en este ángulo es de 1733 kWh/m^2 .

Palabras claves: Ángulo de inclinación, irradiación global, módulo de prácticas, software, rendimiento.

ABSTRACT

At present, the consumption of electrical energy has had a significant increase, however, oil reserves have decreased, significant changes in fuel prices and a notable environmental impact due to emissions of polluting gases from fossil fuels have led to the growth of clean energies such as solar photovoltaic. Achieving the highest efficiency generated by solar panels is a task that is being studied, looking for techniques to find the optimal inclination and orientation, avoiding losses due to shadows for the entire year of operation.

In this document, the design and implementation of a module for the complement in the analysis of the optimal angle and the trajectory map by shading in a photovoltaic system for solar energy applications is carried out. The optimal angle for inclined surfaces varies from 0° to 30° in steps of 5° . It was calculated and simulated by means of the Pvsyst software, where the maximum value of the total daily solar radiation in a specific period was sought. It was found that the optimum angle of inclination changed between 0° and 10° throughout the year in the installations from the UPS without having a percentage of losses, despite this the optimum angle of inclination was reached at 5° the total daily radiation monthly average at this angle is $1733 \text{ kWh} / \text{m}^2$.

Keywords: Angle of inclination, global irradiation, module of practices, software, performance.

Tabla de contenido

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN.....	ii
CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TIULACIÓN.....	iii
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS.....	iv
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS.....	v
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR	vi
DEDICATORIA	7
AGRADECIMIENTOS.....	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INDICE DE FIGURAS	13
INDICE DE TABLAS	14
SIMBOLOGIA.....	15
INTRODUCCIÓN	17
CAPITULO 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.1 Antecedentes	20
1.2 Alcance.....	21
1.3 Objetivo.....	21
1.3.1 Objetivos específicos.....	21
1.4 Propósito del módulo con seguidor solar	22
CAPITULO 2. ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA	24
2.1 Introducción	25
2.2 Descripción de los datos meteorológicos	26
2.3 Instrumentos de medida.....	28
2.4 Radiación solar en la superficie inclinada	30
2.4 Modelos para el cálculo de la radiación solar en la superficie inclinada	31
CAPITULO 3. CLASIFICACIÓN DE SEGUIDORES SOLARES.....	32
3. Clasificación de seguidores solares	33
3.1. Sobre la base del sistema de control utilizado.....	33
3.1.1. Sistema de seguimiento de circuito cerrado	33
3.1.2. Sistema de seguimiento de circuito abierto	34
3.2. Sobre la base del sistema de conducción utilizado.....	35

3.2.1. Sistema de seguimiento solar pasivo.....	35
3.2.2. Sistemas de seguimiento solar activo.....	36
3.3. Basado en grado de libertad.....	37
3.4. Basado en estrategias de seguimiento.....	37
3.4.1. Fecha y hora.....	37
3.4.2. Microprocesadores y sensores electroópticos.....	38
CAPITULO 4. DISEÑO DEL MODULO DE PRUEBAS Y ANALISIS DE TRAYECTORIA.....	39
4.1 Tipo de investigación.....	40
4.1.1 Investigación de campo.....	40
4.2 Módulo de almacenamiento de carga y descarga de Baterías.....	40
4.3 Partes del módulo de análisis de SOC en baterías.....	42
4.3.1 Controlador Solar.....	42
4.3.2 Convertidor o Inversor voltaje.....	42
4.3.3 Medidores Digitales Multifunción.....	42
4.3.4 Batería de Plomo Acido.....	43
4.3.5 Batería de Gel.....	43
4.4 Mejoras al módulo fotovoltaicos aislado.....	44
4.5 Complemento del seguidor solar.....	46
4.6 Orientación e inclinación de los módulos solares fotovoltaicos.....	49
4.6.1 Separación entre paneles solares.....	51
4.6.2 Medidas de parámetros del módulo fotovoltaicos aislado.....	51
4.7 Curva corriente voltaje en paneles solares.....	52
4.8 Análisis de la trayectoria.....	54
4.8.1 Panorámica del mapa.....	54
4.8.2 Procedimiento de cómo utilizar la herramienta.....	55
CAPITULO 5. USO DE SOFTWARE.....	60
5.1 Software a utilizar PVsyst.....	61
5.2 Resultados de la simulación.....	64
CONCLUSIONES.....	67
Anexo A.....	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de la radiación global [8].....	27
Figura 2. Piranómetros CMP 3 para mediciones de irradiancia global	29
Figura 3. Heliógrafo para medir la insolación.	30
Figura 4. Ubicación de paneles solares respecto al sol	33
Figura 5. Diferentes sistemas de seguimiento solar.	36
Figura 6. Módulo de análisis para el estado de la carga de dos tipos de baterías.....	41
Figura 7. Interfaz de la monitorización y control remoto	44
Figura 8. Características técnicas de los diferentes modelos.....	45
Figura 9. Modulo del sistema aislado con los cambios realizados.....	46
Figura 10. Modulo fotovoltaico aislado junto al seguidor solar.....	47
Figura 11. Panel de 30W Zimpertec	49
Figura 12. Correcta ubicación de paneles solares respecto a la O&I	50
Figura 13. Inclinación del panel respecto al plano receptor	52
Figura 14. Curva características de paneles fotovoltaicos.	53
Figura 15. Representación en el sistema de referencia terrestre del vector solar	54
Figura 16. Selección del lugar para el cálculo de la posición del sol.	55
Figura 17. Mapa interactivo donde ubica el lugar seleccionado.....	58
Figura 18. Mapa de trayectoria sobre la Universidad Politécnica Salesiana.....	59
Figura 19. Diferentes tipos de sistemas en el software Pvsyst	62
Figura 20. Variables meteorológicas en el lugar seleccionado.	63
Figura 21. Interfaz principal del proyecto de dimensionamiento de Pvsyst	63
Figura 22. Orientación para un plano inclinado fijo	64
Figura 23. Resultados de la inclinación optima	65
Figura 24. Mapa de trayectoria del sistema FV.....	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características técnicas del piranómetro	29
Tabla 2. Características técnicas del panel solar de 30W.....	48
Tabla 3. Valores de voltaje y corriente a diferentes inclinaciones.....	52
Tabla 4. Valores de elevación y azimut en la UPS	57
Tabla 5. Rendimiento del plano inclinado respecto a la inclinación.....	64

SIMBOLOGIA

a,b	Constantes de Angstrom (para Bhopal,)
dn	Día del año
Gsc	Constante solar 1.367 kW m^2
Hg	Radiación desactivada diaria promedio mensual (kWh / m ² -día)
Kt	Índice de claridad promedio mensual
Ht	Radiación solar incidente total sobre superficie inclinada
Ht,b	Radiación desactivada en superficie inclinada (kWh / m ² -día)
Ht,t	Radiación reflejada del suelo en superficie inclinada (kWh / m ² -día)
Ho	Radiación solar extraterrestre diaria promedio mensual (kWh / m ² -día)
FV	Sistema fotovoltaico
Imax	Corriente máxima
Isc	Corriente de corto circuito
Hd,cs	Componente circunsolar de radiación difusa
Hd,hz	Componente de brillo del horizonte de la radiación solar difusa
LJ	Modelo de Liu y Jordan
Ko	Modelo de Koronakis
kWh	Kilovatio hora
R_b	Radiación isotrópica difusa
s	Promedio mensual de horas diarias de sol brillante (horas)
Smax	Promedio mensual de las horas diarias máximas posibles de sol
USD	Dólares americanos

W	Vatio
V _m	Voltaje máximo
V _{oc}	Voltaje de circuito abierto
W _p	Vatio pico
kWh	Kilovatio hora
Ø	Angulo de latitud
λ	Lambda, longitud de onda
F	Factor de modulación
B	Angulo de inclinación
Б	Albedo

INTRODUCCIÓN

En un mundo de rápido crecimiento y con importante incremento poblacional la energía de fuentes convencional es cada vez más escasas con lo cual la integración de la energía de origen renovable de origen fotovoltaica es una solución a la problemática energética, con un desarrollo sostenible y una alta confiabilidad del servicio especialmente en la generación distribuida [1], en la literatura especializada se espera que la electricidad generada por fuentes limpias crezca un aproximado de 45 billones de kWh para el 2050, en varias partes del mundo, la tecnología fotovoltaica (PV) es la alternativa muy utilizada para generar energía eléctrica utilizando fuentes limpias de energía renovable. La energía eléctrica convertida por la radiación de energía en la luz del sol en forma de fotoelectrones puede recolectarse convencionalmente en cualquier parte del mundo. Por lo tanto, la inversión y la instalación de sistemas fotovoltaicos aumentaron significativamente en los últimos años [2].

Aunque la tecnología fotovoltaica ofrece varias mejoras en el sistema eléctrico convencional sea de forma directa o de soporte, los despliegues fotovoltaicos a gran escala también involucran grandes desafíos y riesgos en el sistema por armónicos generados por la electrónica de potencia, atrayendo numerosos intereses de investigación e inversionistas. Al implementar un sistema o planta solar los inversionistas buscan obtener el máximo rendimiento posible de la planta solar y de los desarrollos de generación de energía fotovoltaica, por lo que el sistema fotovoltaico debe funcionar cerca del punto de máxima potencia para maximizar la producción de energía [3].

La radiación solar se comporta de forma inestable por lo que la energía generada por el sistema fotovoltaico se comporta de forma dinámica al estar involucrada varias variables internas y externas, la temperatura afecta considerablemente en el rendimiento del panel fotovoltaico, la

conversión fotovoltaica tiene una baja eficiencia, otro factor importante es la inclinación del panel fotovoltaico. La inclinación del panel involucra en el ángulo de orientación del módulo fotovoltaico por lo tanto la irradiación incidente sobre la superficie de un módulo varía de una intensidad a otra, dependiendo del ángulo de configuración del módulo fotovoltaico.

En muchas instalaciones los paneles se colocan de forma fija predefiniendo los niveles de elevación y ángulo acimutal a los cuales se los denomina sistema de placa plana fija. En plantas o huertas solares al colocar paneles de forma fija el rendimiento del sistema no es el óptimo, por el nivel de inversión se coloca seguidores solares de uno o dos ejes, un seguidor de un eje típicamente sigue la trayectoria del sol en dirección este- oeste, este tipo de seguidor da como resultado una aceptable eficiencia del sistema, sin embargo provocará una gran pérdida de la energía solar generada por el módulo fotovoltaico debido a que se limita en la rotación del módulo, al no estar combinando movimientos diarios como estacionales.

CAPITULO 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

La integración de la energía renovable (ER) en especial de los sistemas solares fotovoltaicos aumenta de forma acelerada en los últimos años, lograr aprovechar la máxima energía que generan es uno de los desafíos, adicional a las fuentes de energía limpias convencionales, las fuentes de energía renovable se están convirtiendo en fuentes de energía más prominentes para abastecer el crecimiento de la demanda del sistema para el desarrollo sostenible y la confiabilidad de la generación.

En muchos lugares, los paneles solares fotovoltaicos es la alternativa de máxima prioridad para generar energía eléctrica utilizando fuentes de energía renovable. La energía eléctrica convertida por los fotoelectrones o llamado radiación solar de energía en la luz del sol puede recolectarse convencionalmente en cualquier lugar del planeta. En virtud de aquello, aprovechar u obtener la mayor cantidad de energía aumentan significativamente la instalación en los últimos años. La energía fotovoltaica sigue alcanzando a nivel mundial aproximadamente 8 billones de kWh para 2050, liderada por China [4].

La energía eléctrica generada por un sistema fotovoltaico, es inestable debido a los cambios meteorológicos e involucra varias variables internas y externas, un panel fotovoltaico comercial tiene baja eficiencia y alta sensibilidad a la temperatura, especialmente en las regiones tropicales, la eficiencia fotovoltaica depende de la temperatura, uno de los aspectos críticos para mejorar la eficiencia es el ángulo que incide la luz del sol en la superficie de un módulo fotovoltaico [5]. La energía proveniente del sol que incide sobre el módulo fotovoltaico depende no solo de la irradiación solar contenida en la luz solar, sino que los ángulos de orientación del módulo fotovoltaico también son factores importantes para obtener la energía solar. Por tanto, la irradiación incidente sobre la superficie de un módulo varía de una intensidad a otra, dependiendo del ángulo

de configuración del módulo fotovoltaico. En la instalación clásica, un módulo fotovoltaico se coloca para fijarse con valores predefinidos de nivel de elevación y ángulo acimutal, lo que se denomina sistema de placa plana fija. Esta configuración se basa en las posiciones óptimas de valores predefinidos de ángulo de inclinación y ángulo de acimut.

1.2 Alcance

Actualmente la UPS sede Guayaquil en sus laboratorios tiene módulos didácticos de prueba para el estudio y comportamiento de sistemas fotovoltaicos, los mismos que carecen de un módulo para conocer el comportamiento real ante los rayos solares durante el día

Ante esta problemática se ha decidido plantear el diseño, construcción e implementación en el banco de prueba ya existente en los laboratorios, incorporando una estructura donde se pueda realizar la simulación de la inclinación de los rayos del sol con respecto al panel fotovoltaico, y a su vez poder obtener datos del rendimiento de este.

Por último, se resolverá la necesidad que tienen los estudiantes para aprender, visualizar e interactuar de manera didáctica en cada caso de estudio para sistemas fotovoltaicos.

1.3 Objetivo

Diseñar, construir e implementar módulo para el estudio de rendimiento de paneles fotovoltaicos en posiciones óptimas para su funcionamiento.

1.3.1 Objetivos específicos

Estudiar el comportamiento de un panel fotovoltaico.

Adquirir datos del rendimiento de un panel fotovoltaico a diferentes ángulos solares.

Desarrollar prácticas en base a datos adquiridos en un panel fotovoltaico.

1.4 Propósito del módulo con seguidor solar

Como se indicó en el alcance del presente documento, la necesidad de contar con un módulo de energía solar y que el mismo cuente con un panel con seguimiento solar para el desarrollo de las clases experimentales a igual que investigación motiva al desarrollo de la presente tesis, en la literatura actualizada se encuentran varias técnicas para conseguir el propósito mencionado donde involucran variables como la hora solar, día del año, temperatura, las investigaciones de alto impacto revisadas se indican a continuación.

Un sistema con seguidor solar de doble eje con colector de lentes de Fresnel lineal. La curva de análisis de rendimiento del colector fue diseñada para temperaturas entre 40°C y 90°C . Se encontró que la eficiencia global del colector era inferior al 20%. Fue así debido a la reflexión, refracción y deflexión en las lentes de Fresnel, lo que resultó en una pérdida óptica del sistema de lentes con un 47% de la energía total disipada. La convección de radiación térmica representó hasta el 6% del total. Para mejorar la eficiencia global se recomendó instalar un receptor evaluado y aislar el sistema de recirculación lo que podría incrementar la eficiencia global hasta en un 55%.

Por lo general, en los mecanismos de seguimiento de doble eje clásicos, se utilizan 2 servomotores DC o motores paso a paso para el movimiento del panel en ambas direcciones respectivas, pero Oner et al. (2009) diseñaron un sistema de seguimiento solar de doble eje con un solo motor esférico con la capacidad de mover el panel en ambas direcciones. Se comparó el rendimiento del panel fotovoltaico inclinado fijo y el seguidor solar de doble eje con el panel fotovoltaico basado en motor esférico. Se encontró que el voltaje de salida del panel para el mecanismo de seguimiento era mejor que el fijo en todo momento del día y particularmente después de las 13:00 ya que después las luces solares que caen sobre el panel se vuelven más densas [6], [7].

Yao y col. (2014) proyectaron un rastreador que emplea un sistema de montaje de reloj de declinación que ubica el eje primario en dirección este-oeste. Sobre la base del sistema de montaje, se implementa la estrategia de seguimiento normal para sistemas fotovoltaicos planos y estrategias de ajuste diario para sistemas de energía solar de concentración (CSP). La estrategia de seguimiento normal produce menos errores en comparación con el valor preestablecido. La estrategia de ajuste diario necesita ajustar el eje primario una vez al día y el eje secundario se gira a una velocidad constante de 15 / h. Los resultados de la prueba de precisión mostraron que el error de seguimiento de la estrategia de seguimiento normal estaba dentro de 0,15 °.

**CAPITULO 2. ESTIMACIÓN DE LA
RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA
SUPERFICIE INCLINADA**

2.1 Introducción

La radiación solar es la energía proveniente del sol, la cual se emite en el espacio en toda dirección, es participe de los procesos atmosféricos y del clima, la radiación emitida es de onda corta, al pasar por la atmosfera se debilita por los efectos de difusión, reflexión y absorción a causa de las nubes, gases y polvos presentes en el ambiente [8], [9].

Conocer los valores de radiación solar es de suma importancia para una serie de procesos o aplicaciones en las diferentes áreas de las ciencias, entre las cuales se destaca la fotovoltaica como fuente alternativa para generar electricidad principalmente en áreas de acceso remoto o en el uso de agua caliente sanitaria para nuevos diseños en edificios inteligentes.

En Ecuador el crecimiento de sistemas que funcionan a base de la energía del sol ha sido lento a nivel país, sin embargo los sistemas fotovoltaicos han tenido un rápido crecimiento a pequeña escala en sistemas aislados o dispositivo portátiles, al tratarse de una energía limpia y sostenible con un bajo coste hoy en día se pueden encontrar tecnologías de vanguardia como la energía solar térmica, arquitectura solar, energía fotovoltaica y cocinas solares [10].

Las radiaciones solares globales, directas y difusas se evalúan mediante dispositivos ampliamente conocidos, entre los más destacados están las estaciones meteorológicas que tienen varias ciudades, universidades y institutos de investigación en el mundo. Los dispositivos más comunes utilizados para la medición de forma directa de la radiación solar son el piranómetro, pirheliómetro y piranómetro con sombreadores. Métodos matemáticos han sido utilizados para obtener los valores de radiación sin embargo en la práctica han sido reemplazados por los dispositivos mencionados, el costo que implica la instalación de los dispositivos de medición solar o estaciones en todas las ubicaciones es alto.

2.2 Descripción de los datos meteorológicos

La tierra recibe diariamente una gran cantidad de energía solar, el poder de la energía por medio de la radiación solar depende de varios criterios, condiciones meteorológicas, fenómenos de dispersión, reflexión y absorción, polvos suspendidos en el ambiente. La cantidad promedio de radiación solar recibida en cualquier superficie terrestre, es de aproximadamente 1367 W / m² [11].

La energía recibida en la superficie depende del día del año, mediante la siguiente ecuación puede ser calculado:

$$E_{sol} = 1367 \times \left(1 + 0.00334 \times \cos \left(360 \times \frac{j - 2.7206}{365} \right) \right) \quad (1)$$

Donde j es el día del año que se requiere conocer la cantidad de energía, llegando a 365 para el 31 de diciembre.

La abundante disponibilidad de radiación solar en una región puede ser beneficiosa para los dispositivos y equipos basados en energía solar, conocer valores precisos es fundamental para el diseño y análisis energético de los sistemas fotovoltaicos.

En el presente documento utiliza datos meteorológicos de Meteonorm de PVsyst que incluyen latitud, longitud, período de insolación, radiación solar extraterrestre y radiación solar global disponibles en el software, los datos pueden ser descargados diarios o mensuales, el dato utilizado se la conoce como radiación global, incluso el programa ofrece datos de la NASA y de otras bases con un alto grado de confiabilidad.

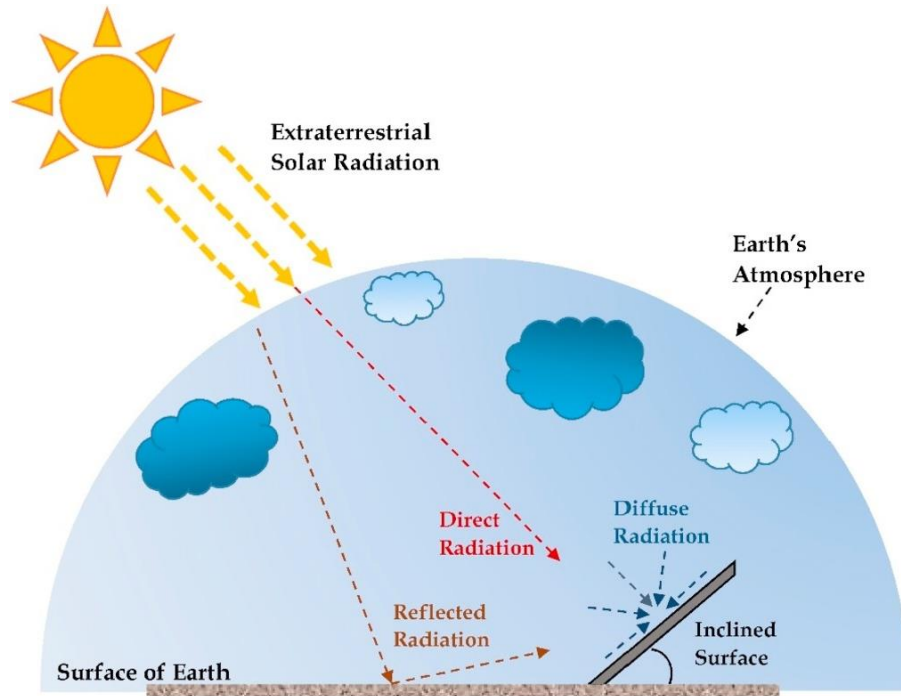


Figura 1. Componentes de la radiación global [12].

Esta radiación se la utiliza para los cálculos de dimensionamientos en los sistemas fotovoltaicos, la radiación global está compuesta por la radiación directa que es la que proviene del sol y depende de su posición, por la radiación difusa que es la que proviene de la atmósfera y es consecuente de los procesos de reflexión, proceso de difracción, proceso de dispersión y absorción, y por la radiación reflejada (Albedo) la cual es la procedente de la reflexión de la radiación incidente en el entorno, al sumar las diferentes radiaciones da como lugar la global que se entiende como la radiación total incidente sobre una superficie ($AM1.5G = 1.000 \text{ W/m}^2 = 1\text{Sol}$).

El promedio mensual diaria de radiación global está asociada con la luz diaria y se puede calcular mediante la ecuación 2.

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (2)$$

donde, $\frac{H}{H_0}$ análisis de regresión entre el índice de claridad a y b son los coeficientes de Angström, (S) es el valor medido de las horas de sol.

La relación de duración de la insolación es la relación entre las horas de sol diarias(S) y horas de luz (S0). El ángulo de declinación solar (δ) se da mediante la ecuación 3.

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{(n + 284)360}{365} \right) \quad (3)$$

dónde, n es el día del año.

En los últimos años la radiación solar se atenúa en la atmósfera debido a varios factores entre los cuales se destacan el dióxido de carbono, ozono y vapores de agua en el aire atmosférico. La conversión de energía solar en trabajo útil tiene un límite debido a su contenido de entropía. Por lo tanto, la energía de la radiación solar es siempre inferior al 100%, la conversión comercialmente se encuentra alrededor del 20%.

2.3 Instrumentos de medida

Las mediciones de radiación solar se realizan mediante piranómetros (radiación solar global). Estos equipos son radiómetros diseñados para medir la irradiancia global sobre una superficie la cual es la resultante de los flujos radiantes en la longitud de onda que va de 300 a 2800 nm. La radiación recibida se convierte en calor por la superficie ennegrecida. La variación de temperatura entre la superficie oscura y el cuerpo del instrumento es proporcional a la irradiancia de la radiación solar global, medida por varios termopares y se muestra en la tabla 1.

Especificaciones del piranómetro CMP3.	
Rango espectral (50% puntos)	300 a 2800 nm
Sensibilidad	5 a 20_V / W / m2
Impedancia	20 a 200_
Irradiancia operativa máxima	2000 W / m2
Tiempo de respuesta (63%)	<6 s
Tiempo de respuesta (95%)	<18 s

Tabla 1. Características técnicas del piranómetro

En la figura 2 se muestra el piranómetro CMP3 el cual es un instrumento dedicado a medir la irradiancia solar, el dispositivo permite medir la energía solar desde ciertas longitudes de onda que cubre el espectro solar y el hemisferio entero con un amplio campo de visión, una de las ventajas de este equipo es el uso continuo de funcionamiento.



Figura 2. Piranómetros CMP 3 para mediciones de irradiancia global.

Otro de los instrumentos ampliamente utilizados para medir la irradiancia solar es el Heliógrafo entre sus principales características esta poder registrar la luz solar incidente sobre una ubicación en varios días, con lo cual se conoce la duración del día respecto a las estaciones. Mediante el aparato se puede medir la insolación que llega al lugar en un día en concreto, el dispositivo se compone de una bola de vidrio macizo de unos 5 cm de radio utilizado como una lente para concentrar los rayos solares y enviar a un foco determinado, en cuanto el sol se va moviendo

durante el día, el foco va recorriendo una banda donde se fija una cartulina en paralelo, el poder calorífico va trazando una línea a través de la carbonización, la acentuación depende de la intensidad de los rayos del sol, en la figura 3 se muestra el dispositivo.



Figura 3. Heliógrafo para medir la insolación.

2.4 Radiación solar en la superficie inclinada

La irradiancia solar que recibe una superficie inclinada se define como la suma del conjunto de fotoelectrones que incluyen la radiación directa o de haz, la radiación reflejada de las diversas superficies vistas por las superficies inclinadas y los tres componentes que conforman la radiación global. La radiación solar incidente total en la superficie inclinada se obtiene con la suma de la radiación del haz, es la radiación reflejada y es la radiación difusa en una superficie inclinada.

La radiación de haz diaria es el promedio mensual en la superficie horizontal y generalmente se estima restando la radiación difusa de la radiación global en las superficies horizontales, se puede

definir como una función de la transmitancia de la atmósfera, que es igual y estará determinada para la superficie que está inclinada hacia el ecuador en el hemisferio norte o 180° en el hemisferio sur (ángulo de acimut más favorable, para colector de PV módulo), mientras que la radiación reflejada es la parte de la radiación solar total que es reflejada por la superficie de la tierra y por cualquier otro objeto que intercepta la superficie, como árboles, terreno o edificios, sobre una superficie expuesta al cielo se denomina radiación reflejada en el suelo.

2.4 Modelos para el cálculo de la radiación solar en la superficie inclinada

Uno de los modelos ampliamente utilizados es el de Liu y Jordán (LJ) donde se considera que la radiación solar sobre una superficie inclinada está compuesta por tres partes tales como; haz, reflejado desde el suelo y fracción difusa. Se asumió que la radiación difusa es solo isotrópica; mientras que, el brillo del horizonte y el circunsolar se tomaron como cero. Por lo tanto, y la fórmula general para calcular la radiación total en una superficie inclinada se propone como la suma del haz, la radiación reflejada por la tierra y la radiación difusa isotrópica.

El modelo de Hay y Davies presume que la radiación difusa del sol está compuesta únicamente por un componente isotrópico y circunsolar, mientras que no se tuvo en cuenta la parte que ilumina el horizonte. De igual manera asume que las partes difusas que provienen directamente de la dirección del sol son circunsolares y que el componente difuso atraviesa el resto del domo del cielo de forma isotrópica. Estos componentes se ponderaron según un índice de anisotropía, el índice de anisotropía se utiliza para cuantificar una parte de la radiación difusa tratada como circunsolar y se asumió que la parte restante de la radiación difusa era isotrópica. La parte reflejada se trata de la misma manera que sugirieron Liu y Jordán.

CAPITULO 3. CLASIFICACIÓN DE SEGUIDORES SOLARES

3. Clasificación de seguidores solares

En la literatura especializada los sistemas de seguimiento solar se pueden clasificar de diversas maneras. Puede clasificarse según el sistema de conductores utilizado, según el sistema de control utilizado, de la estrategia de seguimiento utilizada en el sistema o según el grado de libertad de movimiento que puede moverse el sistema. En la figura 4 se indica la trayectoria solar y la ubicación de los paneles solares

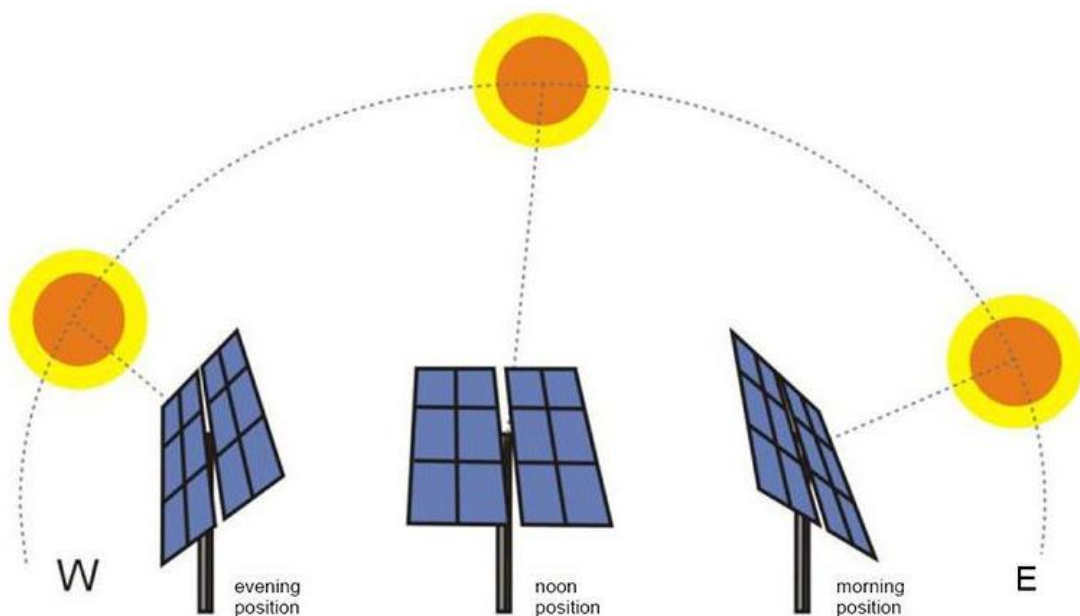


Figura 4. Ubicación de paneles solares respecto al sol

3.1. Sobre la base del sistema de control utilizado

3.1.1. Sistema de seguimiento de circuito cerrado

Es uno de los sistemas de control ampliamente utilizado, independiente del sistema de conducción utilizado para el movimiento del rastreador, puede ser de sistema pasivo o algún algoritmo predefinido sobre la base de cálculos matemáticos basados en la trayectoria del sol, cuando se despliegan sensores para detectar la posición del sol que luego se alimenta, respaldado por el

sistema para que el comparador / microprocesador utilizado en el sistema pueda detectar el error y dar la señal de activación requerida a los motores para corregir el error, entonces se dice que el sistema está funcionando según los principios del sistema de control de retroalimentación. Y los rastreadores que implementan el sistema mencionado anteriormente se conocen como rastreadores solares de circuito cerrado. Un sistema de seguimiento de doble eje consta de 4 celdas fotovoltaicas como sensores, 2 motores y un mecanismo de control de tres posiciones. La radiación se mide mediante sensores y los motores se controlan en consecuencia.

3.1.2. Sistema de seguimiento de circuito abierto

En el control de circuito abierto utiliza un controlador que transmite la señal de activación al motor basándose únicamente en las entradas de datos actuales y el algoritmo de funcionamiento del sistema. Una de las desventajas es no tener la función de observar y evaluar los datos de salida con respecto a la salida deseada. Por lo tanto, es más barato y sencillo de implementar en comparación con el sistema de seguimiento de bucle cerrado, pero no implica ningún proceso de rectificación y, por lo tanto, el algoritmo por sí solo debe garantizar que logre el objetivo deseado. Algunos modelos han sido construidos mediante un rastreador solar basado en un microprocesador de doble eje que utilizaba una estrategia de seguimiento basada puramente en los cálculos de las coordenadas astronómicas del sol, es este tipo de control muestra una mejor capacidad de seguimiento que las contrapartes controladas por sensores convencionales.

3.2. Sobre la base del sistema de conducción utilizado

3.2.1. Sistema de seguimiento solar pasivo

Este sistema no implica accionamientos mecánicos para orientar el panel hacia las radiaciones del sol. En cambio el sistema, utiliza algún fluido de gas comprimido de bajo punto de ebullición o aleaciones con memoria de forma como actuadores que, al recibir una iluminación desequilibrada, obliga al panel a experimentar algún movimiento angular para restablecer el equilibrio de irradiancia al inducir la expansión térmica en gases expansibles o en aleaciones con memoria de forma. Cuando un lado del gas líquido recibe más cantidad de energía térmica que el otro, entonces el gas se expande y se mueve hacia el otro lado del rastreador. Provoca un tirón gravitacional desequilibrado y obliga al panel a inclinarse hasta que se alcanza un punto de iluminación igual. Aunque es menos complejo y efectivo, no proporciona una alta eficiencia a bajas temperaturas. Algunos autores desarrollaron un nuevo seguidor solar de bajo costo basado en una aleación con memoria de forma que podría recolectar hasta un 40% de energía excedente en comparación con los colectores de inclinación fijos.

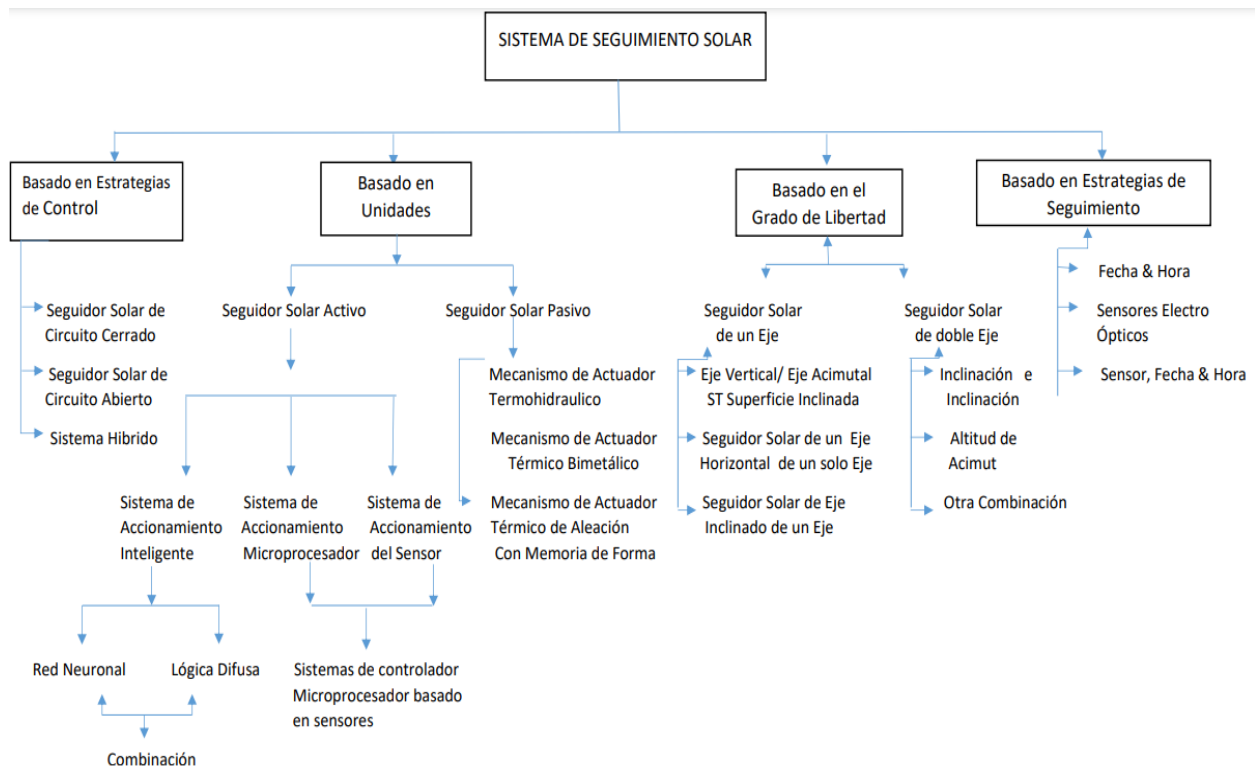


Figura 5. Diferentes sistemas de seguimiento solar.

3.2.2. Sistemas de seguimiento solar activo

Estos sistemas utilizan accionamientos eléctricos y trenes de engranajes mecánicos para orientar los paneles de manera normal a las radiaciones del sol. Utiliza sensores, motores y microprocesadores para el seguimiento y son más precisos y eficientes que los seguidores solares pasivos. Pero, por otro lado, se necesitan para funcionar y consumir energía. Cuando los seguidores no están correctamente alineados con el sol, los sensores reciben una iluminación diferente y crean una señal diferencial que luego es utilizada por un comparador o un microprocesador para determinar el movimiento apropiado en la dirección apropiada. A continuación, se envía la señal requerida a los motores para que funcionen en consecuencia. Este proceso se detiene en un punto donde los sensores reciben la misma iluminación y el módulo fotovoltaico normalmente se alinea con las radiaciones del sol. Algunos investigadores utilizaron un seguidor solar activo mientras

experimentaba para mejorar la eficiencia térmica. Descubrieron que el sistema basado en rastreadores mostraba una ganancia general del 40% en energía térmica almacenada en comparación con el fijo.

3.3. Basado en grado de libertad

El grado de libertad representa el número de direcciones en las que puede ocurrir un movimiento independiente. En base a esto, los sistemas de seguimiento se han clasificado en sistemas de seguimiento solar de eje único y doble eje. Pero antes de entrar en esta clasificación, echemos un vistazo a los diferentes tipos de ejes y ángulos que juegan un rol importante en estos sistemas de seguimiento. Para determinar las ubicaciones y direcciones adecuadas, estos parámetros juegan un papel imperativo.

3.4. Basado en estrategias de seguimiento

3.4.1. Fecha y hora

Este sistema de seguimiento utiliza únicamente algoritmos predefinidos basados en cálculos matemáticos sobre la trayectoria del sol para determinar la posición del sol en un momento particular con el fin de orientar los paneles fotovoltaicos en consecuencia. No hay circuito de retroalimentación ni ningún sensor involucrado. Por tanto, el algoritmo es el único responsable del funcionamiento eficaz del sistema, desarrollaron un concentrador parabólico de rastreo simple y de bajo costo cuyo funcionamiento estaba totalmente basado en los ángulos de azimut y altitud precalculados. Tuvo éxito en generar temperaturas en el rango de 200–600 ° C, mientras que sus contrapartes fijas logran alcanzar entre 80–200 ° C.

3.4.2. Microprocesadores y sensores electroópticos

Se trata de sensores para la detección de la posición del sol. Y la señal se alimenta al microprocesador que además instruye (da señal) a los motores a los necesitados. Kalogirou diseñó un sistema de seguimiento solar de un solo eje suficientemente preciso utilizando 3 resistencias dependientes de la luz como sensores, un circuito electrónico y un motor de CC con engranajes reductores. Aquí los sensores dan la entrada al circuito electrónico que además activa el motor.

**CAPITULO 4. DISEÑO DEL
MODULO DE PRUEBAS Y ANALISIS
DE TRAYECTORIA**

4.1 Tipo de investigación

La metodología que se utiliza para cumplir con los objetivos de esta investigación se consolida en lograr identificar lo que contiene el problema con lo cual se identifica el más indicado, por medio será necesario conocer el tipo de investigación y por ende el enfoque a utilizar, adicionalmente señalar las técnicas para recolectar información aplicando distintas herramientas.

4.1.1 Investigación de campo

Según el concepto de investigación de campo es necesario conocer datos de primera mano, que sea esencial para el correcto desarrollo del trabajo de investigación a realizar y con ella esclarecer el inconveniente que se desea corregir, según el concepto de Rojas indica que:

La investigación de campo es la que consigue recopilar datos desde donde se origina el problema a investigar. Por tal razón es importante que el investigador tenga habilidades de observador de todas las relaciones para que poder determinar las conclusiones con mayor relevancia y alcanzar los objetivos planteados.

En esta investigación de campo por medio del módulo a presentar se realizará para identificar cual es la causa que afecta al rendimiento de los paneles fotovoltaicos por el ángulo en que se encuentra ubicado de esta forma por medio del análisis se logra una solución exacta e idónea.

4.2 Módulo de almacenamiento de carga y descarga de Baterías

El módulo realizado por los estudiantes de Ingeniería Eléctrica pretende analizar de una forma experimentar el estado de la batería en los parámetros de estado de carga y en el estado de descarga SOC, costo, perdidas, eficiencia, para ser usado en una microrred, el estudio en el módulo dependerá de las series

de experimentos o pruebas realizadas en dicho módulo de la Universidad, y posterior a esto se presenta un reporte con los datos apropiados y recolectados para el óptimo uso de las baterías.

Para realizar las pruebas del laboratorio se usan dos tipos de baterías comercializadas en el mercado y mediante un software de simulación se comprueba el error de los datos recolectados, en la figura número 6 se muestra el modulo realizado por los autores.

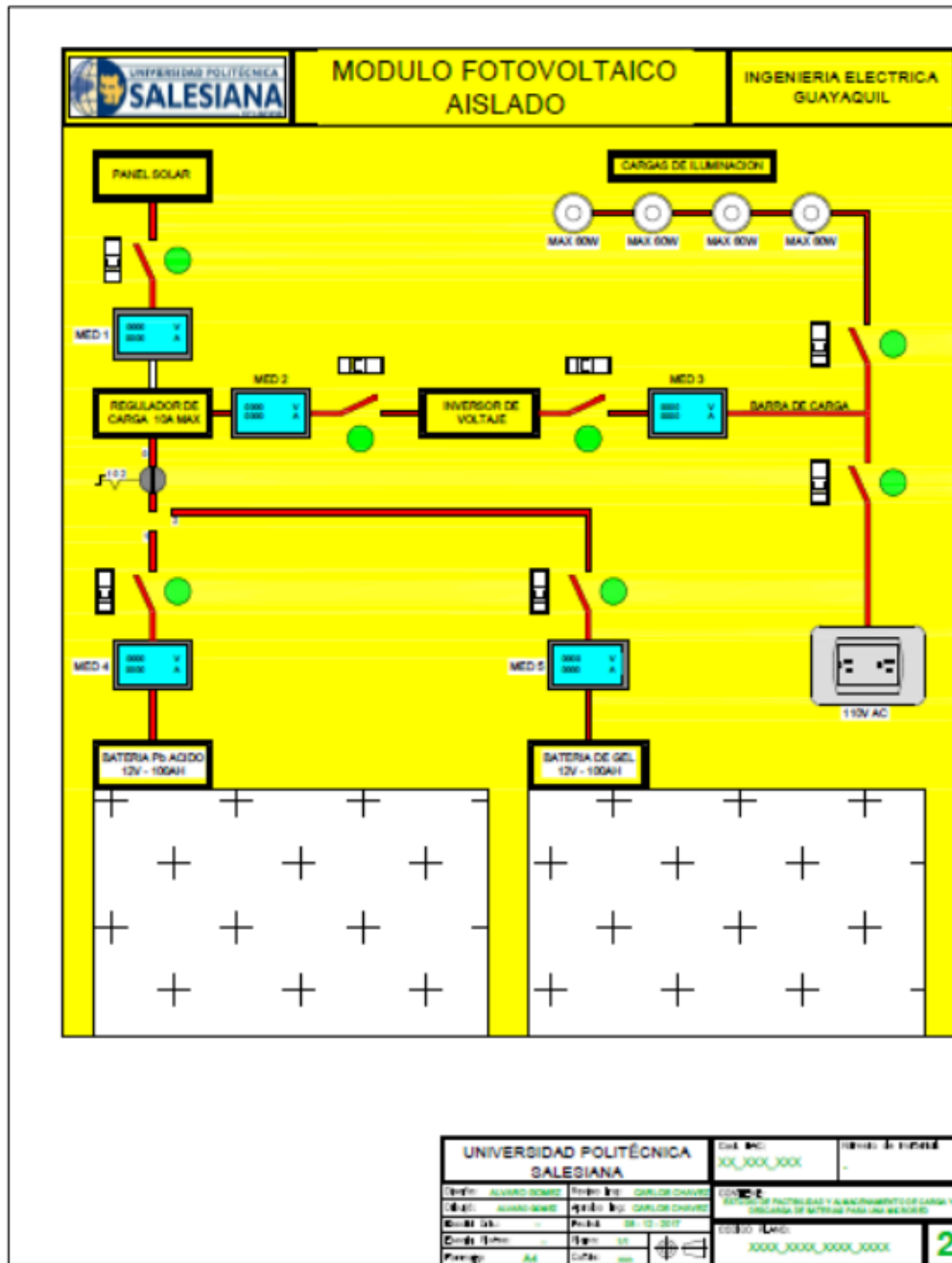


Figura 6. Módulo de análisis para el estado de la carga de dos tipos de baterías.

4.3 Partes del módulo de análisis de SOC en baterías.

4.3.1 Controlador Solar

El regulador o controlador de carga que se utiliza en el tablero presentado es del fabricante AllPower modelo, con voltaje de 12/24 V, el nivel de voltaje está de acuerdo con nivel de voltaje de los paneles solares tipo policristalinos, este tipo de módulos tiene la ventaja de protección sobre el estado de carga, protección cortocircuito, de nivel de voltaje también ofrecen una protección de sobre corriente, las características importantes a destacar en el equipo es el control de la carga. El regulador se conecta de la siguiente forma: se conectar el panel fotovoltaico al controlador y posterior se conecta la carga a ser satisfecha por el regulador, los datos técnicos del controlador se encuentran en la página web del fabricante Victron energy.

4.3.2 Convertidor o Inversor voltaje

El equipo encargado de invertir el voltaje de DC a AC es el inversor, en el módulo diseñado se utiliza de 600 W máximos de potencia, el voltaje de entrada es de DC/AC 12VDC, la corriente de entrada de 28 A y el voltaje de salida de 120 VAC a 60 Hz, este tipo de equipos tiene una alta eficiencia superior al 95% en la entrada y estarán conectadas a las cargas del módulo. El inversor es de tipo genérico y tiene una onda sinusoidal pura a la salida, el equipo se lo observa en la parte posterior del módulo, como se presenta en la figura 6.

4.3.3 Medidores Digitales Multifunción

Al ser un módulo de investigación en todas las etapas se necesita conocer los valores de las variables, los dispositivos de medición en usados en el módulo FV aislado, el cual contiene varias funciones para medir los parámetros eléctricos tales como el voltaje, corriente y la potencia activa (w), a través de un display de cristal líquido con lo cual se visualiza los datos a ser recolectados en

de acuerdo al funcionamiento de las baterías de los dos tipos de baterías seleccionados y a ser analizados.

4.3.4 Batería de Plomo Acido

Es la batería más utilizada alrededor del mundo por tal razón los autores han utilizado en el módulo fotovoltaico autónomo, la presentada es del fabricante Milenium 31-DC-100 Ah entre las características se destaca su diseño de tipo sellada libre de mantenimiento y electrolito líquido entre los vasos, también es de ciclo profundo con lo cual puede ser utilizada en sistemas de almacenamiento de energías renovables y a su vez funcionar como un sistema de respaldo de energía.

4.3.5 Batería de Gel

Es otro tipo de batería que ha ganado terreno en el mercado por sus ventajas constructivas, la batería utilizada es del fabricante Ritar RA12-100, la tecnología que cuenta es AGM (láminas de fibra de vidrio), es libre de mantenimiento lo cual es importante para ambientes corrosivos, entre sus características esta absorber o entregar valores superiores de corriente eléctrica en el proceso de descarga y de carga a diferencia de otros tipos de baterías selladas.

El voltaje nominal es de 12 V, una de las características es el nivel de voltaje intermedio que posee destacándose por su tiempo de vida, no necesita mantenimiento y la importante reducción de gases nocivos, son muy utilizadas en instalaciones donde el equipo se encuentra en movimiento tales como carros casas, caravanas o barcos, lo cual difiere con las baterías de plomo acido al no tener el riesgo de riego del ácido.

4.4 Mejoras al módulo fotovoltaico aislado

La monitorización del sistema es importante por lo cual los autores se plantean buscar equipos con este tipo de funcionalidades, en el mercado local se adquirió el Controlador de carga solar Victron SmartSolar MPPT 100/20, este dispositivo solar recolecta energía de sus paneles fotovoltaicos y almacena en una de las dos baterías del módulo, usando avances en la tecnología, SmartSolar maximiza la producción de energía, impulsándola de manera inteligente para lograr una carga completa en el menor tiempo posible, el controlador extiende el tiempo de vida de las baterías.

Al monitorearen todo tiempo de funcionamiento el voltaje y corriente de salida de los módulos FV, los reguladores MPPT garantiza la recolección de energía disponible. Una de las ventajas es cuando el cielo este nublado busca el punto de máxima potencia



Figura 7. Interfaz de la monitorización y control remoto

La monitorización y control remoto de las funciones del regulador SmartSolar MPPT es por medio del bluetooth integrado, el cual se empareja con algún dispositivo inteligente por medio de VictronConnect. La instalación al estar conectada a Internet, Victron Remote Management Portal proporciona toda la potencia del regulador, en todo momento y ubicación; los servicios disponibles son gratuitos.

De acuerdo a la combinación de la matriz fotovoltaica y la corriente de salida del sistema se selecciona el regulador, en la figura 8 se muestra las características técnicas de los diferentes controladores que están en el rango de las necesidades. El controlador reemplazado soporta un voltaje de entrada de 100 V y la corriente máxima de 20A, la potencia nominal a 12 V es de 290W el voltaje lo marca el banco de baterías.

SmartSolar Charge Controller	MPPT 75/10	MPPT 75/15	MPPT 100/15	MPPT 100/20	MPPT100/20-48V
Battery voltage (auto select)	12/24V				12/24/48V
Rated charge current	10A	15A	15A	20A	20A
Nominal PV power, 12V 1a,b)	145W	220W	220W	290W	290W
Nominal PV power, 24V 1a,b)	290W	440W	440W	580W	580W
Nominal PV power, 48V 1a,b)	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	1160W
Max. PV short circuit current 2)	13A	15A	15A	20A	20A
Automatic load disconnect	Yes				
Max. PV open circuit voltage	75V		100V		
Peak efficiency	98%				
Self-consumption	12V: 25 mA 24V: 15 mA				25 / 15 / 10 mA
Charge voltage 'absorption'	14,4V / 28,8V (adjustable)				14,4V / 28,8V / 57,6V (adj.)
Charge voltage 'float'	13,8V / 27,6V (adjustable)				13,8V / 27,6V / 55,2V (adj.)
Charge algorithm	multi-stage adaptive				
Temperature compensation	-16 mV / °C resp. -32 mV / °C				
Max. continuous load current	15A		20A		20A / 20A / 1A
Low voltage load disconnect	11,1V / 22,2V / 44,4V or 11,8V / 23,6V / 47,2V or Battery Life algorithm				
Low voltage load reconnect	13,1V / 26,2V / 52,4V or 14V / 28V / 56V or Battery Life algorithm				
Protection	Output short circuit / Over temperature				
Operating temperature	-30 to +60°C (full rated output up to 40°C)				
Humidity	95%, non-condensing				
Data communication port	VE.Direct (see the data communication white paper on our website)				

Figura 8. Características técnicas de los diferentes modelos

Para conocer los valores y variables a ser monitorizadas al módulo se incrementa una pantalla que recibe la señal bluetooth, mediante la pantalla se da un aspecto de modernización y sobre todo en cada momento se conoce el estado de las baterías por medio del voltaje, energía almacenada en el banco, potencia generada por el panel fotovoltaico además del voltaje de la matriz FV, en la figura 9 se muestra la implementación de la pantalla.



Figura 9. Módulo del sistema aislado con los cambios realizados.

4.5 Complemento del seguidor solar

Con el objetivo de que los estudiantes puedan evaluar y comprender que la generación de los paneles solares depende de la inclinación del módulo y de la posición del sol se fabrica un seguidor

solar manual con un panel de 30W que se puede ubicar a diferentes inclinaciones y de un brazo móvil que sujeta a un reflector que simula al sol y su respectivo movimiento, en la figura 10 se presenta el módulo junto al seguidor solar mecánico con lo cual se busca orientar los paneles fotovoltaicos a una forma perpendicular a los rayos solares, el seguimiento que va a tener respecto al sol es desde el este al inicio del día hasta el oeste en la puesta del sol.



Figura 10. Modulo fotovoltaico aislado junto al seguidor solar

Se realizaron una serie de pruebas experimentales con el panel solar a diferentes ángulos de inclinación a 5,10°, 20° y 30°, las características técnicas del panel solar se muestran en la tabla 2, mientras que los datos del panel solar se pueden visualizar en el anexo A.

Características Eléctricas

Tipo de modulo	SL030-12P
Potencia nominal	30W
Voltaje nominal (Vpm)	17.5V
Corriente nominal (Imp)	1.72 ^a
Voltaje de circuito abierto (Voc)	22.0V
Corriente de corto circuito (Isc)	1.90 ^a
Eficiencia del modulo	13.90%
Voltaje máximo del sistema	1000 V DC
Peso	2.5 kg
Dimensión	635x340x25 mm
STC:1000 W/m ² , 25 °C	

Tabla 2. Características técnicas del panel solar de 30W

El panel utilizado para el seguidor solar es del fabricante Zimpertec y se muestra en la figura 11, tiene células policristalino y posee 36 células de 156 x31.2 mm, es de origen Alemán, el objetivo del fabricante es enfocarse en productos altamente eficientes y duraderos que se adapten a la demanda energética de personas sin acceso a la red nacional. Al desarrollar sus productos en Alemania y producirlos en una fábrica 100% propiedad en China, pueden satisfacer las expectativas de los mercados externos respecto a calidad y precio. Combinamos diseños confiables con sistemas de cableado Plug & Play altamente flexibles en soluciones de kit para brindar el mejor rendimiento a los usuarios.

Uno de los enfoques de la empresa se basa en producir sistemas solares domésticos. Cuando la luz del día es consumida en su totalidad por el trabajo, los únicos momentos que quedan para la educación son las mañanas y las tardes, que se caracterizan por la falta de luz natural. Por lo tanto, Zimpertec se ha convertido en un objetivo corporativo proporcionar sistemas de iluminación fuera de la red para aplicaciones domésticas. Dimos los primeros pasos hacia este objetivo, cuando equipamos varias casas bolivianas con nuestros sistemas solares domésticos en 2013. De esta

manera queremos contribuir a una vida social floreciente y crear oportunidades de aprendizaje para todos [13].



Figura 11. Panel de 30W Zimpertec

4.6 Orientación e inclinación de los módulos solares fotovoltaicos

De acuerdo a la latitud donde se encuentre la posible implementación del sistema fotovoltaicos depende la orientación e inclinación de los mismo, los valores óptimos de orientación de los paneles serán con dirección al norte o sur, mientras que la inclinación depende de la latitud del lugar de acuerdo a la época del año a ser utilizado el sistema y si tiene algún tipo de respaldo [14].

Sin embargo en ocasiones dependiendo de la latitud no es posible conseguir condiciones de inclinación y orientación óptimas por lo que es necesario calcular las pérdidas de insolación incidentes en el lugar de implementación.

Para obtener el mejor rendimiento del panel fotovoltaicos se busca la perpendicularidad entre el panel y la radiación solar recibida, con lo cual se convierte una mayor cantidad de energía solar en electricidad, las características climáticas pueden disminuir el rendimiento de los paneles, condiciones como nubosidad, nieve, polvo en el ambiente que se puede acumular sobre el módulo fotovoltaico etc., en la figura 12 se muestra la correcta ubicación de los módulos FV

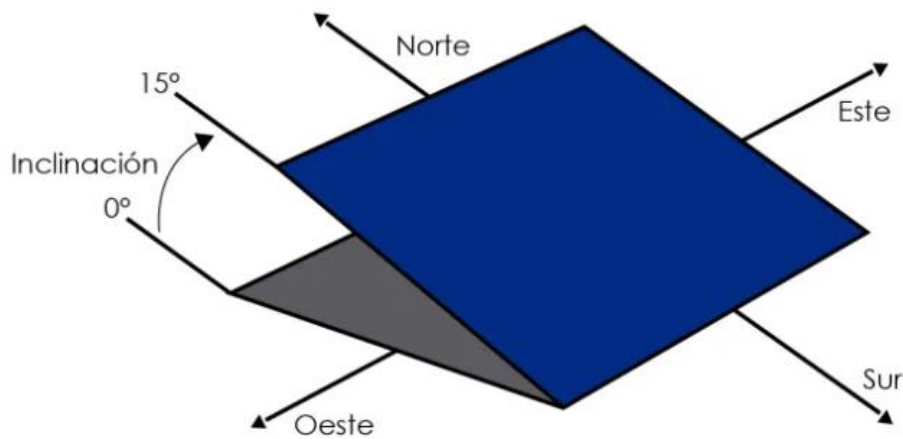


Figura 12. Correcta ubicación de paneles solares respecto a la O&I

Mediante la ecuación 7 se puede utilizar para calcular inclinación óptima del panel solar, con lo cual se puede conseguir una mayor eficiencia del sistema solar sin seguidor.

$$\beta = 3.7 + 0.69 \times (l) \quad (4)$$

Dónde: β es la inclinación óptima en el lugar seleccionado, l es la latitud del lugar.

Para el caso de Guayaquil, aplicamos la ecuación con el siguiente resultado:

$$\beta = 3.7 + 0.69 \times (2.220)$$

$$\beta = 5.23^\circ$$

4.6.1 Separación entre paneles solares

La correcta separación de paneles solares es fundamental para evitar las pérdidas por sombreado entre módulos, con lo cual se garantiza la no superposición de sombras entre las hileras de paneles solares sobre todo en ciertas latitudes donde es notorio el solsticio de invierno / verano.

Para calcular la distancia entre paneles solares sobre el plano en una disposición horizontal se utiliza la siguiente ecuación.

$$d = \left(\frac{h}{\tan\theta} \right) * \cos\beta \quad (4)$$

Dónde: d es la distancia mínima entre las hileras de paneles solares, h es la altura vertical del panel medido desde el suelo, $\tan\theta$ es la tangente del ángulo de la altura solar medida en el peor mes de la latitud y $\cos\beta$ es coseno del azimut del peor mes.

4.6.2 Medidas de parámetros del módulo fotovoltaicos aislado

Uno de los objetivos es conocer el ángulo óptimo del panel solar para obtener la mejor eficiencia y presentar a los estudiantes la parte experimental los valores de voltaje, como se muestra en la figura 12 el panel se coloca a diferentes ángulos de inclinación con un azimut de 0° (es la orientación sobre la superficie virtual o de una esfera virtual) con referencia hacia el sur y con un movimiento del reflector de este a oeste, en caso de tener instrumentación especial se podría recolectar información de la irradiancia global sobre el plano receptor.



Figura 13. Inclinación del panel respecto al plano receptor

Las medidas a tomar son el VOC y la ISC que se produce al unir las dos terminales del panel, al inclinar el panel recibe menos irradiancia el FV por lo tanto el voltaje permanece prácticamente el mismo y la corriente del panel es quien se afecta de forma notable, varias investigaciones han sido desarrolladas respecto al comportamiento, Energetika [15] en su presentación indica que la irradiancia incidente y la temperatura del ambiente influyen directamente en la respuesta eléctrica y la curva I-V se modifica, los estándares internacionales indican que los datos presentados por el fabricante es a una irradiancia de 1000 W/m² a dicho valor se lo conoce como 1 sol y la temperatura del sol es a 25°C, estas condiciones son simuladas en laboratorios de ensayos mientras que en condiciones de trabajo pueden resultar diferentes por lo tanto se necesita tomar las adecuadas correcciones.

Zimpertek	5°	10°	20°	30°
Voltaje de circuito abierto (V)	19	18	18	18
Corriente de corto circuito (A)	1.62	1.52	1.48	1.44

Tabla 3. Valores de voltaje y corriente a diferentes inclinaciones.

4.7 Curva corriente voltaje en paneles solares

Para cada módulo el fabricante en su hoja de datos presenta la curva I-V de acuerdo a las pruebas sometidas a los paneles en el laboratorio, sin embargo esta curva puede ser calculada y graficada por modelos a partir de los parámetros iniciales del fabricante en comparación con la curva experimental medida en el simulador de flash.

Mediante la curva se observa el comportamiento del panel, los valores de voltaje y corriente son tomados en pruebas de condiciones estándares STC, dicha curva varía debido a las condiciones nominales de operación (800 W/m²) difiera a las STC.

En la figura 14 se muestra la curva características I-V en el eje de las X se proyecta el voltaje, mientras que en el eje de las Y la corriente, las líneas de rojo forman el factor de forma, mientras más cercana a la curva IV se considera un panel de mejor calidad, con esta información se puede calcular la eficiencia de la célula fotovoltaica del panel.

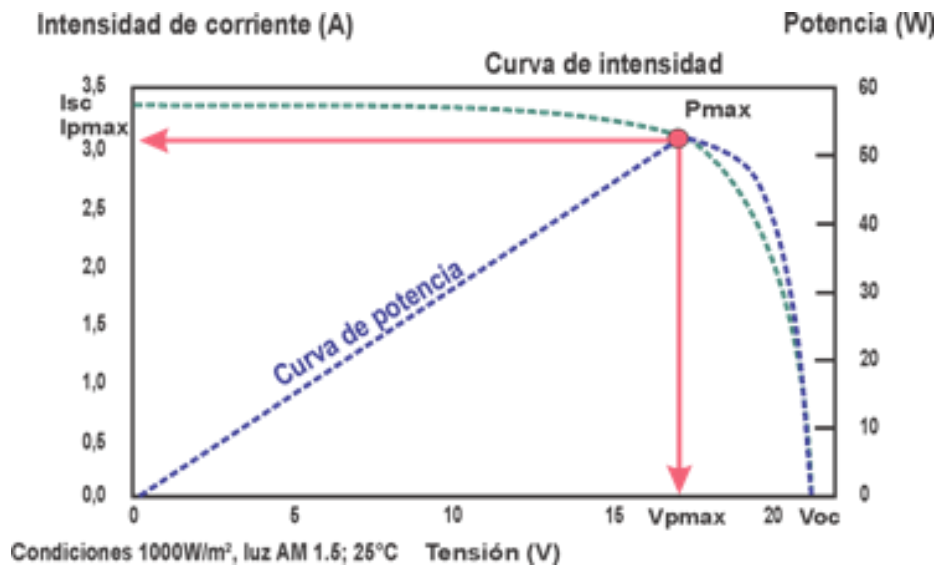


Figura 14. Curva características de paneles fotovoltaicos.

En los paneles fotovoltaicos la calidad puede ser determinada por el área del rectángulo que se forma dividiendo la corriente máxima y el voltaje máximo sobre la corriente de corto circuito que es multiplicada por el voltaje de circuito abierto, mediante la siguiente ecuación se logra calcular el factor de forma.

$$FF = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (5)$$

4.8 Análisis de la trayectoria

La trayectoria de seguimiento solar óptima para sistemas fotovoltaicos es en dos ejes, las cuales están condicionadas en la variable del tiempo y por la posición solar de la esfera celeste. Esta posición está determinada por el vector solar, que se define como un vector unitario siempre orientado al Sol. Consideramos un sistema de referencia terrestre en el que el eje Oz está orientado hacia la dirección cenital, por tal razón el plano XY coincide con el horizonte del sitio, con el eje Ox orientado al oeste y el eje Oy orientado al sur como se muestra en la figura 15 [16].

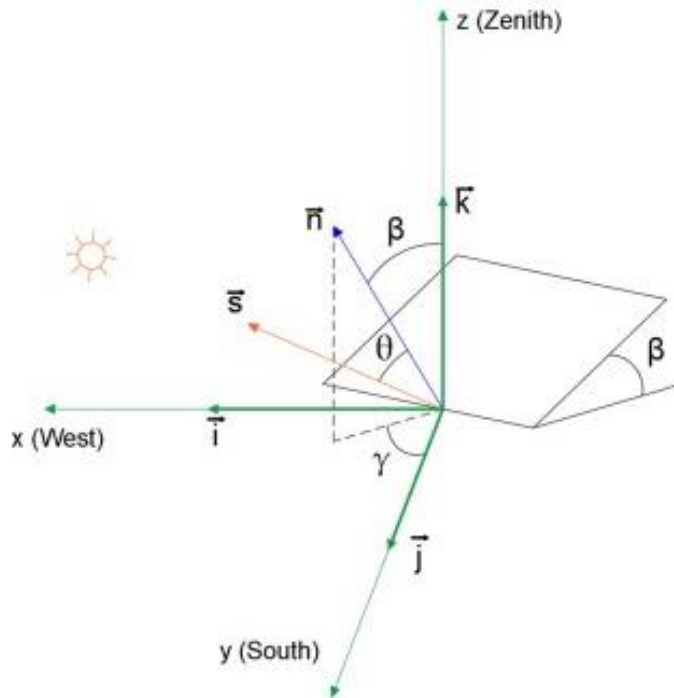


Figura 15. Representación en el sistema de referencia terrestre del vector solar

4.8.1 Panorámica del mapa

La ubicación del sol puede ser calculado para cada lugar en la tierra y en cualquier instante, la ecuación para conseguir dicha posición es:

$$r = r_0 * \left\{ 1 + 0.017 \sin \left[\frac{360}{365} (d_n - 93) \right] \right\} \quad (6)$$

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0.033 \cos \left[\frac{360}{365} d_n \right] \quad (7)$$

Donde, d_n es el día del año para calcular la posición del sol, los valores son desde 1 a 365, r_0 es la distancia media sol-tierra (1.496×10^8 km = 1 unidad astronómica), E_0 es el factor de corrección de la excentricidad.

Mediante la herramienta Sun earth tools se puede calcular la posición del sol en cada lugar y el mapa de trayectoria para lo cual el primer paso es seleccionar el lugar bajo estudio.

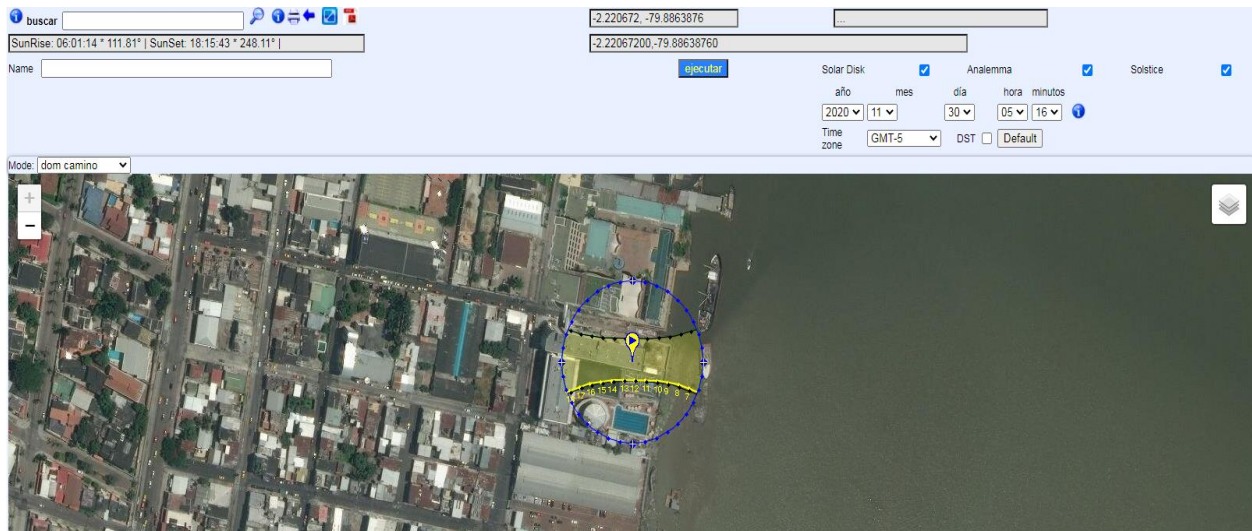


Figura 16. Selección del lugar para el cálculo de la posición del sol.

4.8.2 Procedimiento de cómo utilizar la herramienta

Búsqueda del lugar en estudio y donde se va a instalar el sistema fotovoltaico, para conocer las pérdidas según el mapa de trayectoria.

La herramienta permite el manejo de búsqueda mediante los siguientes pasos

Dirección (ejemplo: Universidad Politécnica Salesiana)

Características Geográficas (ejemplo: Edificio E)

Lugares - Ciudades - Países, provincias y continentes (ejemplo: Guayaquil, Ecuador)

Coordenadas (ejemplo: -2.2 , 79.8).

Control de la panorámica del mapa se logra mediante las flechas arriba, abajo, izquierda, derecha en el mapa para tener un desplazamiento para cualquier dirección. El control del zoom sirve para agrandar o reducir el mapa.

En el presente trabajo se desarrolla en el campus de la UPS, la herramienta tiene un zoom potente y es de fácil manejo para seleccionar el lugar donde se realiza el análisis, luego de ubicar la posición se ejecuta el programa

La carta solar estereográfica de la figura 17 representa el recorrido solar anualmente donde se permite leer la posición del sol en espacios abiertos, las curvas que van desde el este al oeste presentan los recorridos solares del día 21 de cada mes, para el caso de estudio junio en la parte superior y diciembre en la parte inferior, mientras las curvas verticales que atraviesan a las horizontales corresponden a las horas solares, desde el amanecer en el este y al terminar el día en el oeste, el mediodía solar a las 12:00 se encuentra sobre el sur.

La forma de leer la altura solar A es mediante la medición directa de la posición del sol (fecha y hora) en el círculo concéntrico, para leer el azimut Z , se traza una línea desde el centro hasta donde se encuentra la posición del sol y esta se prolonga hasta el círculo graduado exterior. Los valores entregados por el programa de la azimut y elevación a diferentes horas se muestran en la tabla 4.

Fecha:	30-11-20	
coordinar:	-2.220672, -79.8863876	
ubicación:	-2.22067200,- 79.88638760	
Hora	Elevación	Azimut
6:01:14	-0.833	111.81
7:00:00	12.8	111.82
8:00:00	26.65	113.31
9:00:00	40.24	116.97
10:00:00	53.16	124.58
11:00:00	64.31	140.92
12:00:00	70.32	174.15
13:00:00	66.76	211.63
14:00:00	56.56	231.98
15:00:00	43.97	241.36
16:00:00	30.52	245.86
17:00:00	16.72	247.86
18:00:00	2.81	248.24
18:15:43	-0.833	248.11

Tabla 4. Valores de elevación y azimut en la UPS

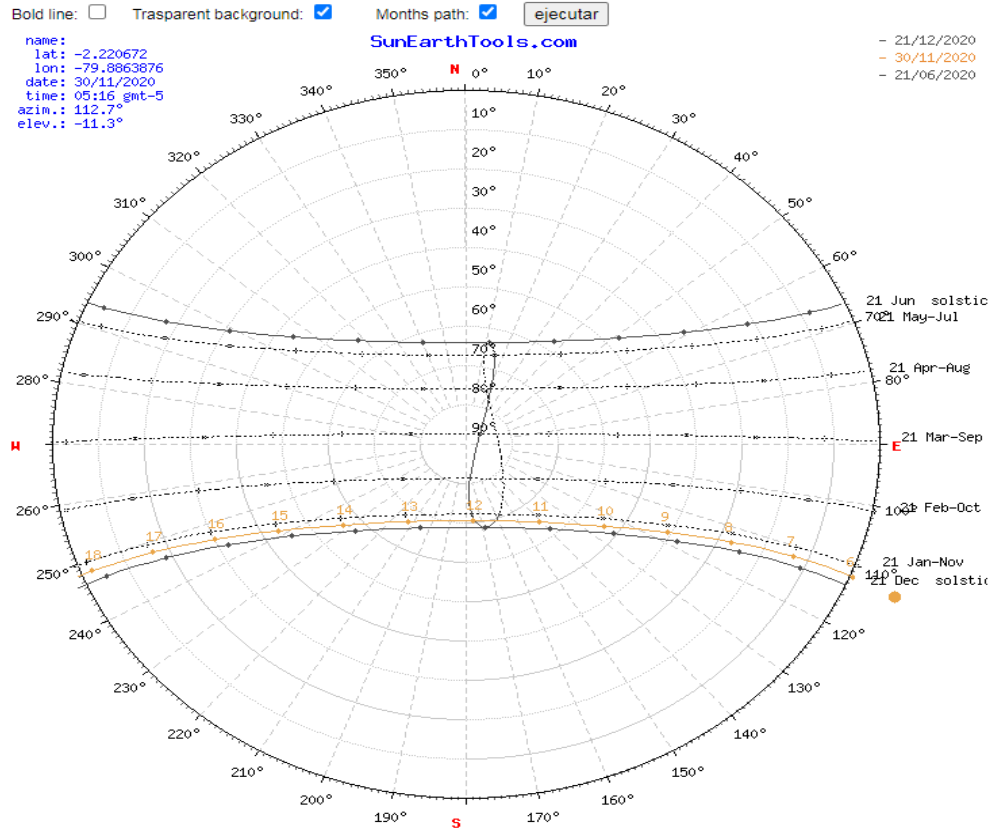


Figura 17. Mapa interactivo donde ubica el lugar seleccionado.

Otra de las gráficas muy apreciadas para conocer el comportamiento del sistema respecto al movimiento del sol y perdidas por sombras es la carta solar cilíndrica que se basa en la proyección del recorrido solar en un cilindro que está rodeando sobre el plano del observador, esta es la diferencia versus a una semiesfera. Si se corta el cilindro en el norte se logra desplegar una proyección que muestra el recorrido del sol, se tiene una panorámica o lectura de la altura y el azimut, la escala utilizada para la altura solar es de 01 a 90° con esto se logra evitar que el sol salga encima del cilindro.

Los datos requeridos para interpretar la gráfica es el ángulo respecto al azimut, y la elevación de objetos cercanos al sistema fotovoltaico, entre las ventajas que presenta la carta cilíndrica es la facilidad para representar el horizonte alrededor del observador, se puede analizar directamente los obstáculos solares. En la figura 18 se muestra el mapa de trayectoria para la ubicación seleccionada.

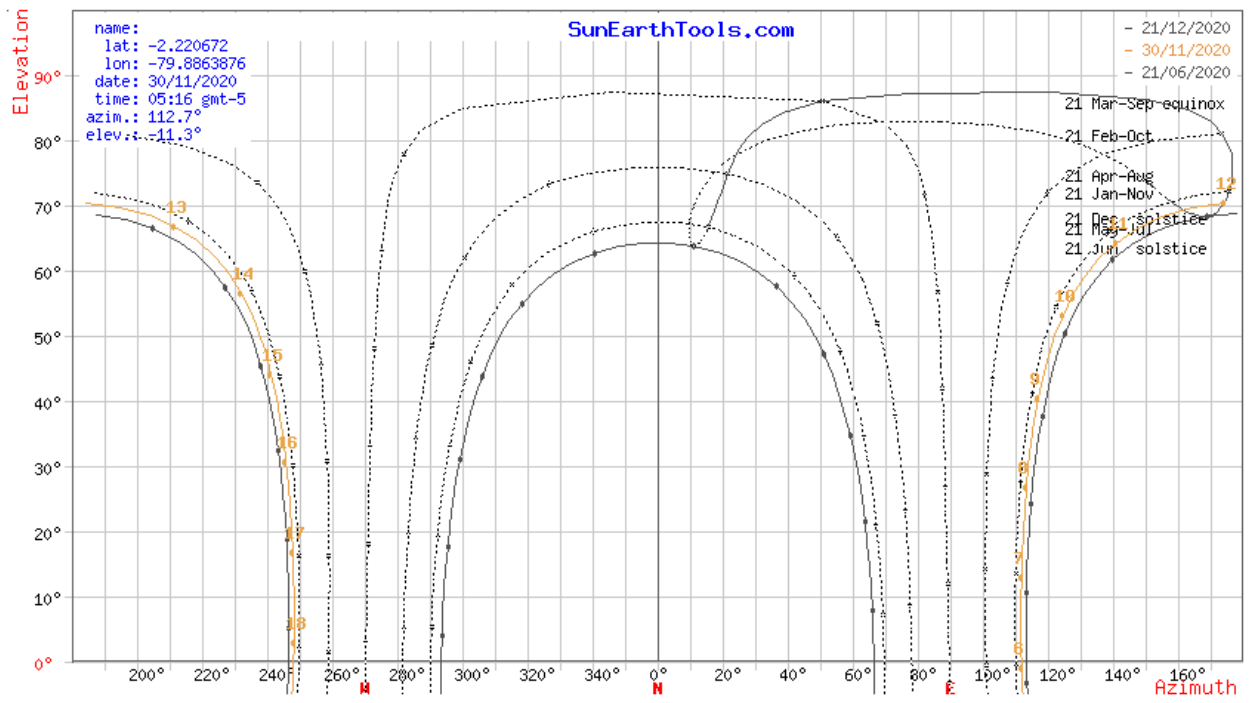


Figura 18. Mapa de trayectoria sobre la Universidad Politécnica Salesiana.

CAPITULO 5. USO DE SOFTWARE

5.1 Software a utilizar PVsyst

Es un software computacional cuyo diseño está basado en un rápido y simple procedimiento para el diseño, dimensionamiento y simulación de sistemas fotovoltaicos con conexión a la red, independientes o bombeo, los pasos a seguir es especificar el área o potencia disponible (FV), seleccionar los módulos FV desde una base interna de componentes comerciales, escoger el inversor desde la librería del programa y finalmente el programa propone una configuración preliminar que permita la simulación si todos los componentes están dentro de un rango de funcionamiento. El software mediante un código de colores envía mensajes de advertencia o error en la configuración [17].

Para el dimensionamiento del sistema se utiliza una herramienta visual, donde para el número de módulos muestra la curva característica I-V, el rango de selección del regulador de carga y los límites de potencia del inversor, además muestra mediante un gráfico la distribución anual de la potencia del arreglo fotovoltaico, el tamaño del inversor está basado en la pérdida por consecuencia de la sobrecarga aceptable para un año de funcionamiento, se sobredimensiona el inversor con un factor de 1,25. También se puede definir condiciones ambientales y de sombreado. Las pérdidas por cableado, calidad del módulo, suciedad, indisponibilidad del sistema y puntos calientes son evaluadas para conocer el comportamiento y eficiencia de la matriz.

La simulación y reporte de resultados calcula para todo el año y se muestra en un archivo PDF exportable, entre los resultados principales se obtiene la producción total de energía (kWh) con lo cual se puede evaluar la rentabilidad del sistema solar fotovoltaico en términos económicos, el factor o índice de rendimiento que indica la calidad del sistema y la energía específica que es la división de la energía para la potencia pico del sistema, este valor indica la producción de la irradiación disponible en el lugar de implementación.

En la figura 19 se muestra las diferentes configuraciones (conectado a la red, independiente y bombeo) que pueden ser dimensionadas y analizadas. Para el análisis de trayectoria y de acuerdo al módulo disponible en la Universidad se escoge un sistema aislado o independiente.

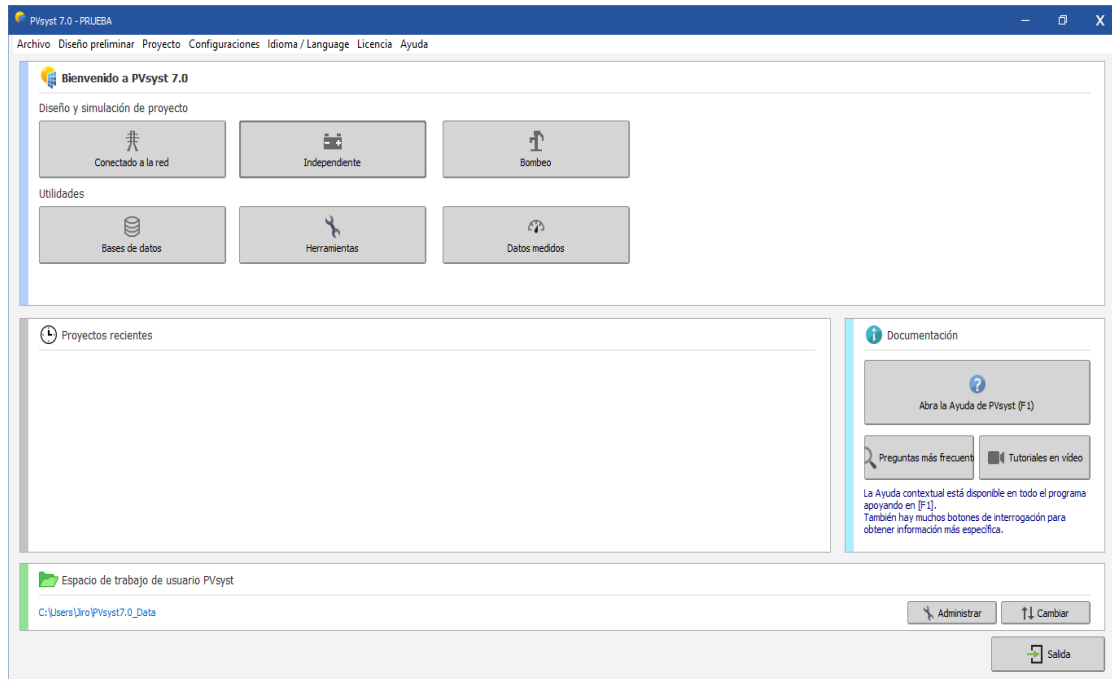


Figura 19. Diferentes tipos de sistemas en el software Pvsyst

Seleccionado el sistema independiente se ubica en el mapa interactivo el lugar de la implementación en términos de latitud y longitud y se descarga las variables meteorológicas de cualquiera de las bases disponibles en meteonorm, Nasa o Pvgis y en diferentes unidades de irradiación, en el presente documento se selecciona la primera base y kWh/m²/mes como unidad. En la figura 19 se muestra las variables meteorológicas como irradiación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento del punto seleccionado.

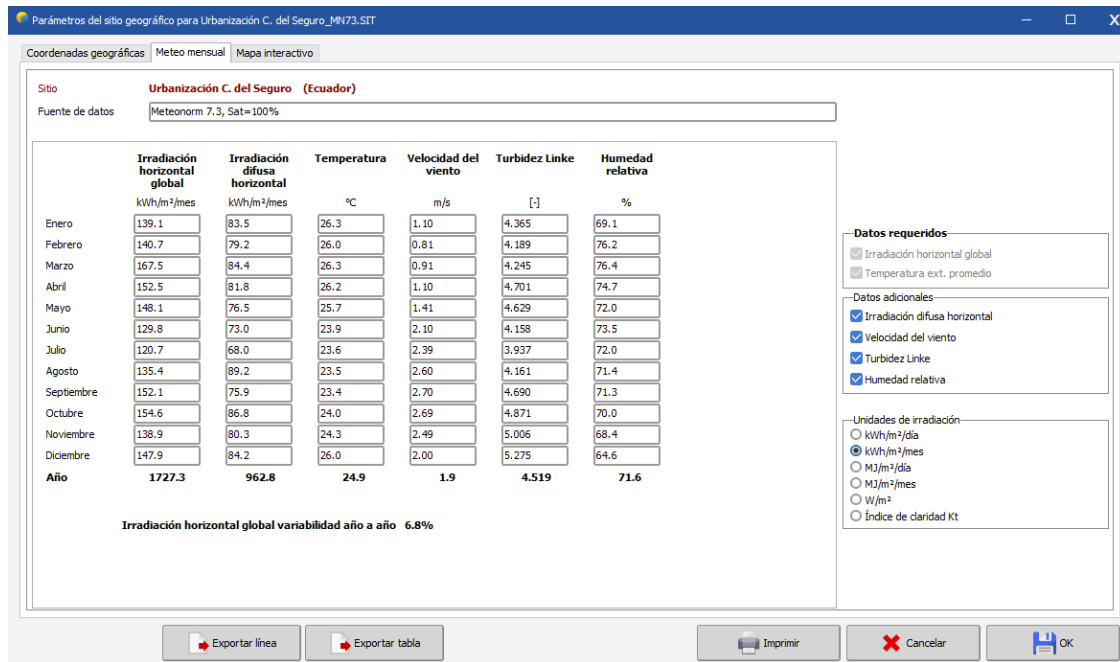


Figura 20. Variables meteorológicas en el lugar seleccionado.

Guardada la ubicación se presenta la figura 21 que es la página principal para el procedimiento de dimensionamiento del SF donde se tiene que ingresar varios parámetros principales que se mencionan a continuación.

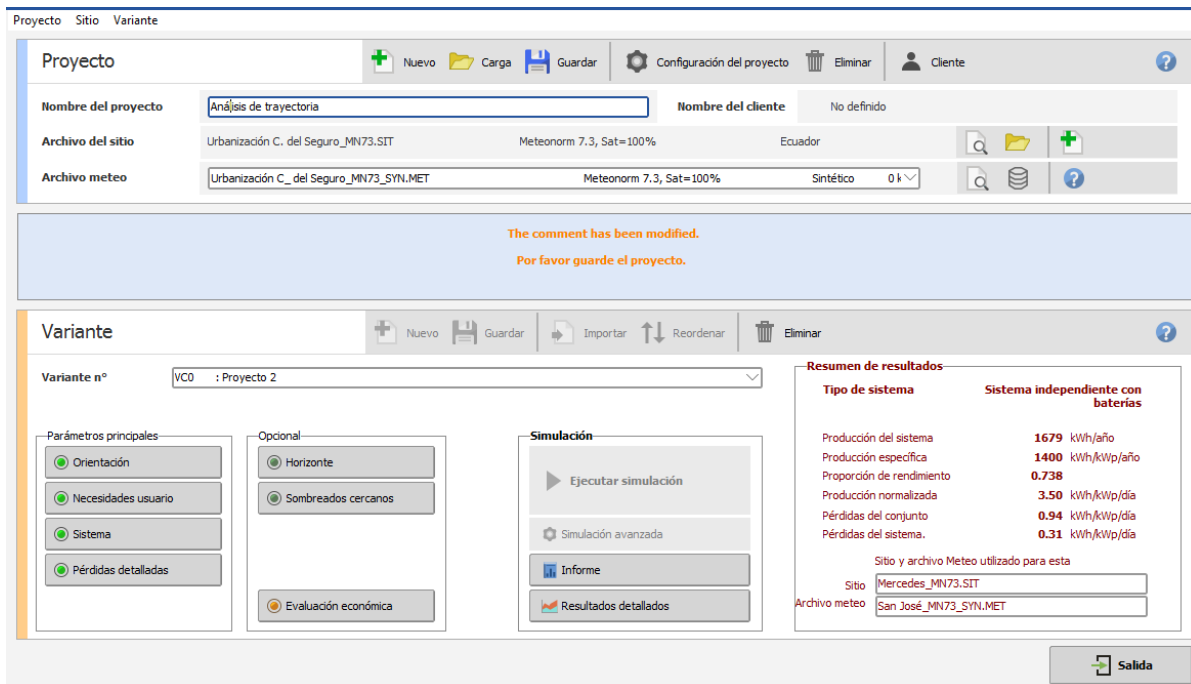


Figura 21. Interfaz principal del proyecto de dimensionamiento de Pvsyst

5.2 Resultados de la simulación

La parte principal en el uso del software para lograr los objetivos se centra en la orientación e inclinación de los paneles y no en el dimensionamiento del sistema, la página a ser modificada se muestra en la figura 21, con las modificaciones a realizar se tiene el mapa de trayectoria.

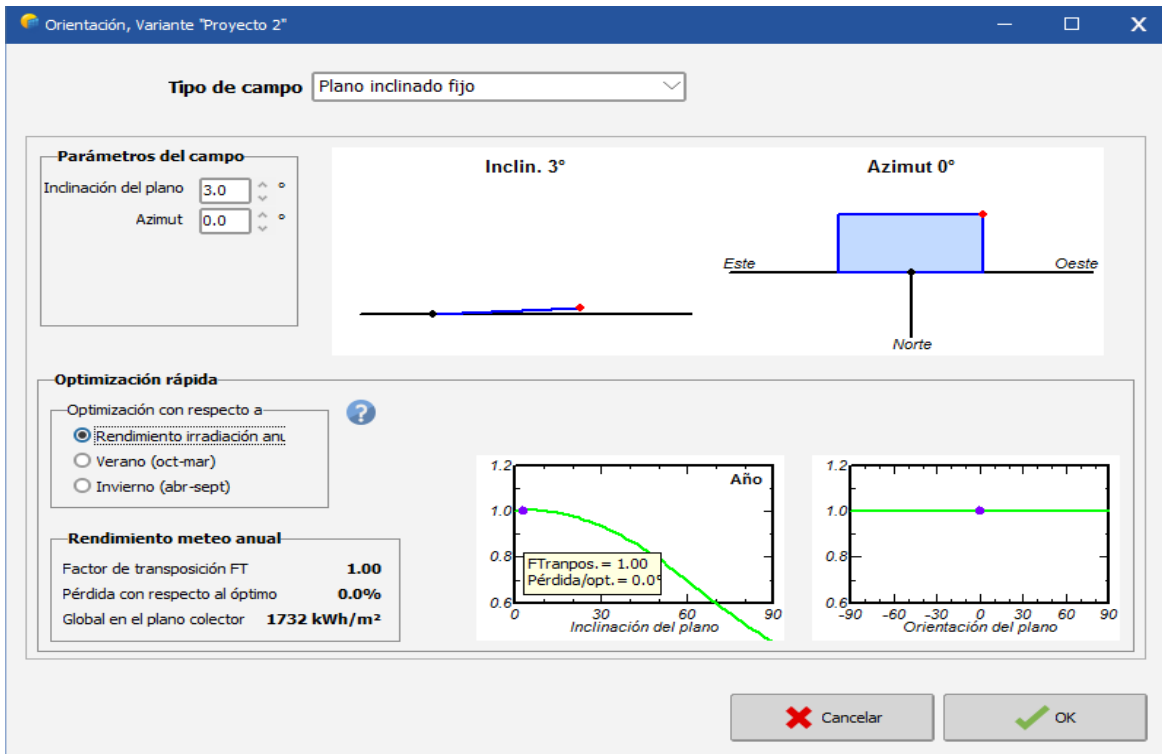


Figura 22. Orientación para un plano inclinado fijo

Para comprobar los diferentes rendimientos que puede tener el panel fotovoltaico respecto a la inclinación vs el voltaje tomado de forma experimental se presenta la tabla 5, donde se observa que los paneles con una inclinación entre 0 y 10° presentan un 0% de pérdidas frente a la inclinación óptima.

Inclinación FV	0°	5°	10°	20°	30°
kWh/m2	1727	1733	1728	1690	1614
Perdidas frente al óptimo	0%	0%	0%	-2.20%	-6.50%

Tabla 5. Rendimiento del plano inclinado respecto a la inclinación.

Sin embargo a una inclinación de 5° se tiene una mayor irradiancia y sería la inclinación a adoptar, teniendo en cuenta el mantenimiento por limpieza de los paneles debido a que a esa inclinación se puede llenar de polvo y reducir notablemente el rendimiento. En la figura 23 se muestra la inclinación del módulo, el azimut a 0° y el rendimiento por inclinación y orientación del plano.

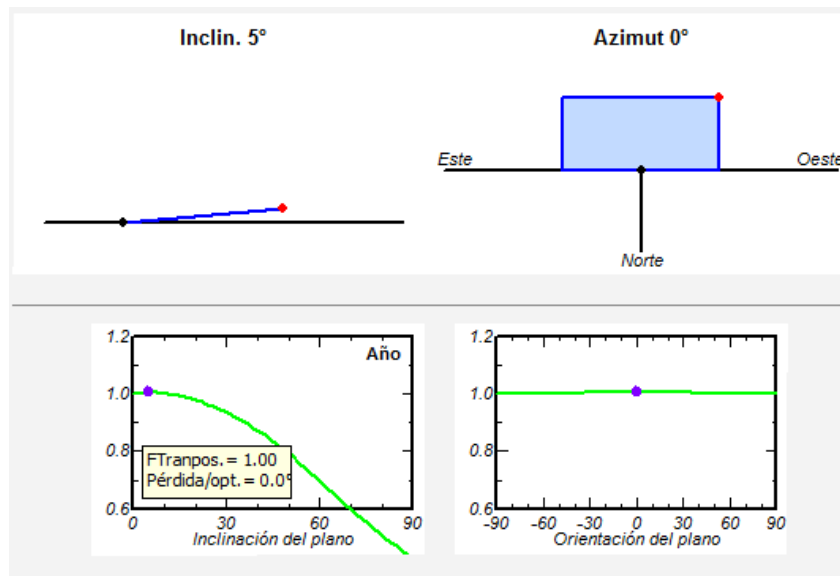


Figura 23. Resultados de la inclinación óptima

El mapa de trayectoria para la inclinación óptima se muestra en la figura 24, donde se observa que no se tiene pérdidas por sombreado durante todo el año, esto se debe a estar en una latitud muy cercano a 0, tener los rayos perpendiculares al plano y tener 12 horas de luz diarias durante todo el año, con lo cual se demuestra que es un lugar propicio para la instalación de este tipo de sistemas solares.

Comentario

Línea de horizonte en Urbanización C. del Seguro

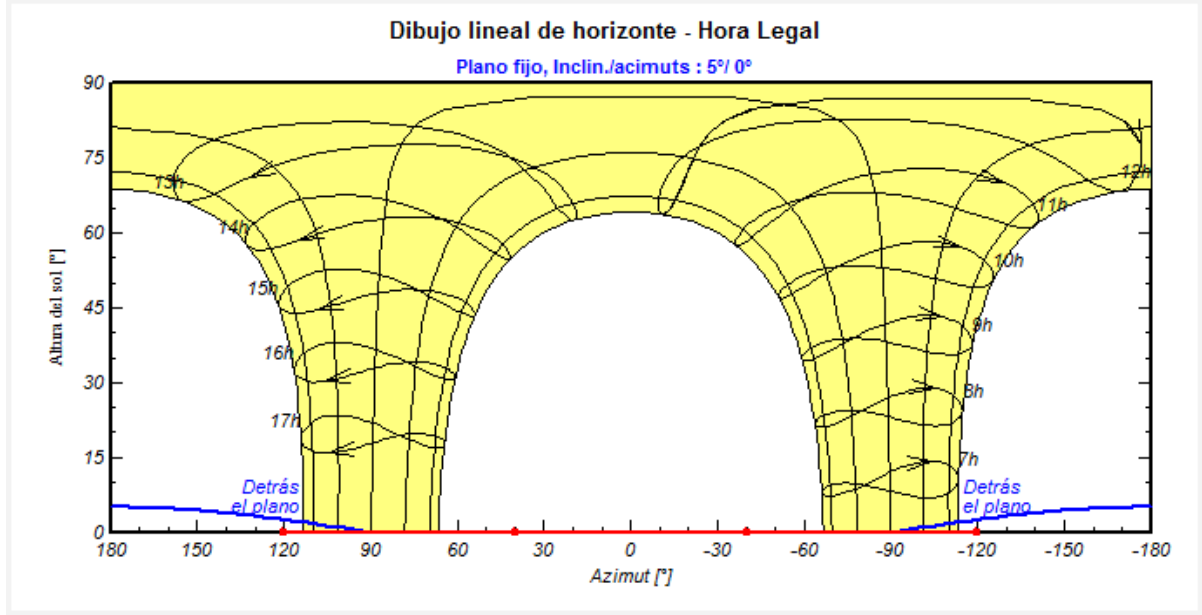


Figura 24. Mapa de trayectoria del sistema FV

CONCLUSIONES

La Universidad Politécnica Salesiana se encuentra ubicada a una latitud cercano al Ecuador lo que hace idónea para la utilización de algunas fuentes renovables y sobre todo para la investigación por tal razón la construcción de un módulo de complemento para el análisis de la orientación, inclinación y mapa de trayectoria es de suma importancia para dar a conocer a los estudiantes en cuanto puede afectar la errónea ubicación de los módulos FV.

Mediante ecuaciones matemáticas se logró determinar la inclinación optima de 5.23° , también se tomó valores de corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto del módulo de 30 W, el mejor valor de corriente se obtuvo a los 5° , para valores de voltaje se mantenía prácticamente estable desde los 0 hasta los 30° , para comprobar los resultados obtenidos se llevó el análisis a un software de dimensionamiento que se pueda modificar los parámetros de inclinación y orientación, para los ángulos comprendidos entre 0 y 10° no se tiene error por ángulo optimo sin embargo para 5° se tiene una mayor cantidad de irradiación solar.

Anexo A.

■ SL030-12P

Temperature Coefficients

NOCT	45 +/-2°C
Voltage temperature coefficient(Voc)	-0.36%/°C
Current temperature coefficient(Isc)	+0.033%/°C
Power temperature coefficient(P _{mp})	-0.44%/°C
Minimum power tolerance	+/- 5%

NOCT:Nominal Operating cell Temperature

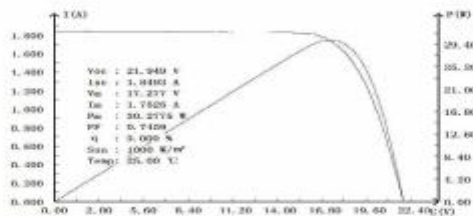
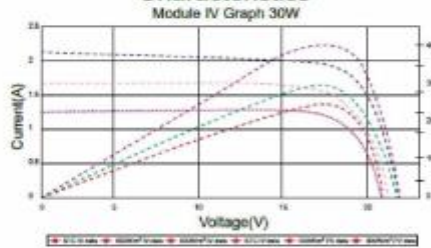
Mechanical Data

Solar Cell	36(2×18) Poly-crystalline 156×31.2mm
Front Glass	3.2mm tempered
Frame	Anodized aluminium

- ISO9001: 2008, ISO14001, ISO18001 certified factory.
- IEC 61215. Safety tested IEC 61730, CE
- Product Liability Insurance guarantee end users' benefit
- Hail impact: 277 g steel ball falling from 1 m height, 60 m/s wind speed increased snow load according to IEC 61215: up to 5400 N/m² wind load and suction according to IEC 61215: up to 2400 N/m²



Characteristics

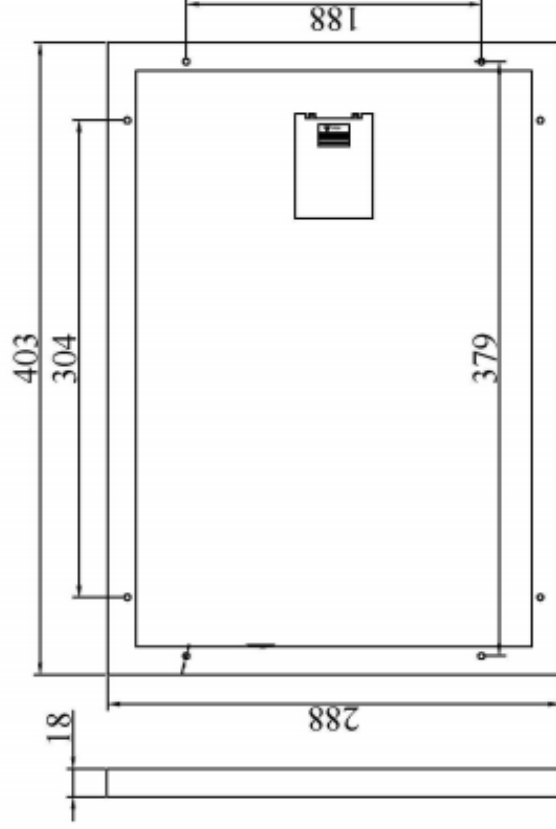
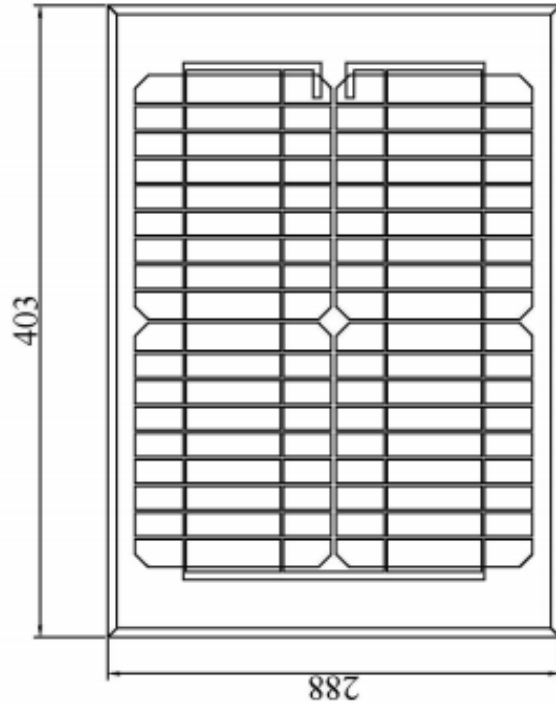


Electrical Data

Module type	SL030-12P
Nominal peak power(Wp)	30W
Nominal voltage(Vmp)	17.5V
Nominal current(Im)	1.72A
Open-circuit voltage(Voc)	22.0V
Short-circuit current(Isc)	1.90A
Module efficiency	13.9%
Operating temperature	-40°C to +85°C
Maximum system voltage	1000V DC
Weight	2.5kg
Dimension	635 x 340 x 25 mm

STC:1000W/m²,25°C





PV module electricity performance parameter(10W18V)	
Maximum Power Voltage (Vmp)	18.26 V
Maximum Power Current (Imp)	0.56 A
Open circuit Voltage (Voc)	22.32 V
Short circuit Current (Isc)	0.66 A

Approve	Anton Zimmermann				1.0618V
Draw		2013/01/07	1 : 4		
			III		A
					1-1

Referencias

- [1] L. Hernández-Callejo, S. Gallardo-Saavedra, and V. Alonso-Gómez, “A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance,” *Solar Energy*, vol. 188. Elsevier Ltd, pp. 426–440, 01-Aug-2019.
- [2] S. G. Anton and A. E. Afloarei Nucu, “The effect of financial development on renewable energy consumption. A panel data approach,” *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 330–338, Mar. 2020.
- [3] M. Al-Dhaifallah, A. M. Nassef, H. Rezk, and K. S. Nisar, “Optimal parameter design of fractional order control based INC-MPPT for PV system,” *Sol. Energy*, vol. 159, pp. 650–664, Jan. 2018.
- [4] G. Ampuño, L. Roca, M. Berenguel, J. D. Gil, M. Pérez, and J. E. Normey-rico, “Modeling and simulation of a solar field based on flat-plate collectors,” vol. 170, no. May, pp. 369–378, 2018.
- [5] C. Jamroen, P. Komkum, S. Kohsri, W. Himananto, S. Panupintu, and S. Unkat, “A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 37, p. 100618, Feb. 2020.
- [6] W. D. Lubitz, “Effect of manual tilt adjustments on incident irradiance on fixed and tracking solar panels,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 5, pp. 1710–1719, May 2011.
- [7] Y. Zhu, J. Liu, and X. Yang, “Design and performance analysis of a solar tracking system with a novel single-axis tracking structure to maximize energy collection,” *Appl. Energy*, vol. 264, p. 114647, Apr. 2020.

- [8] M. Benghanem, "Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 1427–1433, Apr. 2011.
- [9] T. O. Kaddoura, M. A. M. Ramli, and Y. A. Al-Turki, "On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 626–634, Nov. 2016.
- [10] S. Saud, B. Jamil, Y. Upadhyay, and K. Irshad, "Performance improvement of empirical models for estimation of global solar radiation in India: A k-fold cross-validation approach," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 40, p. 100768, Aug. 2020.
- [11] O. Şenkal, "Modeling of solar radiation using remote sensing and artificial neural network in Turkey," *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 4795–4801, Dec. 2010.
- [12] B. Jamil and E. Bellos, "Development of empirical models for estimation of global solar radiation exergy in India," *J. Clean. Prod.*, vol. 207, pp. 1–16, Jan. 2019.
- [13] J. Liu, M. Wang, J. Peng, X. Chen, S. Cao, and H. Yang, "Techno-economic design optimization of hybrid renewable energy applications for high-rise residential buildings," *Energy Convers. Manag.*, vol. 213, p. 112868, Jun. 2020.
- [14] "Cálculo de la posición del sol en el cielo para cada lugar en cualquier momento." [Online]. Available: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es. [Accessed: 05-Dec-2020].
- [15] "Energetika - Curva I-V de un panel fotovoltaico." [Online]. Available: <http://www.energetika.com.ar/Curva I-V.html>. [Accessed: 29-Nov-2020].
- [16] L. M. Fernández-Ahumada, J. Ramírez-Faz, R. López-Luque, M. Varo-Martínez, I. M.

Moreno-García, and F. Casares de la Torre, “Influence of the design variables of photovoltaic plants with two-axis solar tracking on the optimization of the tracking and backtracking trajectory,” *Sol. Energy*, vol. 208, pp. 89–100, Sep. 2020.

- [17] Version 6.67, “PV syst Home.” [Online]. Available: <http://www.pvsyst.com/en/>. [Accessed: 04-Jan-2018].