



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN
EN ENERGÍAS RENOVABLES

INFORME TÉCNICO

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE
PARAMETROS DE RADIACIÓN
SOLAR PARA UN SISTEMA DE
ENTRENAMIENTO
FOTOVOLTAICO EN LA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA,
COLOMBIA

PARA LA OBTENCIÓN DE TÍTULO DE
**INGENIERO EN ENERGÍAS
RENOVABLES**

PRESENTA

JOSE ANTONIO CULEBRO AVILA

DIRECTOR

DR. CARLOS ALONSO MEZA AVENDAÑO

CODIRECTOR

MG. VÍCTOR MANUEL GARRIDO ARÉVALO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Noviembre del 2025



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
SECRETARÍA GENERAL
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR
AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Lugar: Tuxtla Gutiérrez; Chiapas
Fecha: 29 de octubre de 2025

C. José Antonio Culebro Ávila

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería en Energías Renovables

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

Simulación y análisis de parámetros de radiación solar para un sistema de entrenamiento fotovoltaico en la

Universidad de Pamplona, Colombia

En la modalidad de: Informe Técnico

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Dr. Juan Luis Pérez Ruíz

Dr. Pascual López de Paz

Dr. Carlos Alonso Meza Avendaño

Firmas:

Ccp. Expediente



Pág. 1 de 1
Revisión 4

Agradecimientos

Con todo el amor que pueda caber en mi corazón estaré eternamente agradecido con mis padres Antonio Culebro y Patricia Avila, sin el apoyo incondicional que han brindado toda mi vida probablemente no hubiera logrado algo.

A mi hermano y abuelita que son parte fundamental de mi persona.

De igual manera agradezco el trabajo y apoyo del Dr. Carlos Alonso Meza Avendaño que me acompaño en todo el proceso y parte de la carrera, quien es uno de los profesores con los que yo sentí afinidad, asimismo agradezco al profesor Mg. Víctor Manuel Garrido Arévalo que me guío durante la investigación y a la Universidad de Pamplona que me acogió durante mi estancia en Pamplona.

También agradezco a la Dra. Laura Vereá, profesora con la que sentí cercanía durante la carrera, y que me dio una de las mejores enseñanzas que he recibido “la felicidad es la paz con una pizca de alegría”, palabras que recuerdo a menudo.

Resumen

En el presente informe técnico se describe la metodología y resultados obtenidos en la investigación realizada en Pamplona, Norte de Santander, cuyo aporte radica en la manera óptima y lógica de posicionar los paneles solares de manera objetiva en el edificio Simón Bolívar de la misma institución desafiando el reto de la oscilación solar en ambos hemisferios por la cercanía a la región de la línea de ecuador.

Para ello se usó cierto lenguaje de programación y códigos establecidos por una comunidad destinada al apoyo colectivo en la energía solar fotovoltaica. Todo con el objetivo de desarrollar un sistema solar fotovoltaico de entrenamiento para los alumnos de tan prestigiosa universidad.

Se presentaron resultados que apelan al pensamiento lógico, sin embargo, quedan a la interpretación del autor. Así mismo la investigación deja las puertas abiertas para futuras practicas dirigida a los alumnos de ingeniería de la Universidad de Pamplona.

Índice

1. Introducción.....	6
1.1 Planteamiento del problema.....	7
1.2 Justificación.....	7
1.3 Antecedentes.....	8
1.4 Objetivo.....	9
1.4.1 Objetivos específicos.....	9
2. Fundamentos	10
2.1 Radiación.....	10
2.1.1 Radiación solar	10
2.1.2 Radiación total.....	11
2.1.3 Radiación de cuerpo negro.....	11
2.1.4 Ley de desplazamiento de Wien.....	12
2.2 Espectro electromagnético.....	13
2.2.1 Espectro solar terrestre.....	14
2.3 Efecto fotoeléctrico.....	14
2.3.1 Energía del fotón	15
2.4 Semiconductores.....	15
2.4.1 Teoría de bandas	15
2.4.2 Semiconductores intrínsecos y extrínsecos.....	16
2.4.3 Dopaje N y P.....	17
2.4.4 Efecto fotovoltaico.....	17
2.5 Modulo fotovoltaico	18
2.5.1 Celda Solar	18
2.5.2 Sistema fotovoltaico	19
2.5.3 Sistema aislado.....	20
2.5.4 Sistema interconectado a red	20
2.5.5 Conexión serie y paralelo.....	21
2. 6 Módulo de entrenamiento solar.....	22
2.7 Conceptos solares.....	22
2.7.1 Ángulo de inclinación y azimut	22
2.7.2 Posición solar	25
2.7.3 Declinación solar	26
2.7.4 Horas solar pico	26

3. Descripción de las funciones específicas y globales desarrolladas	27
3.1 Recurso solar de Pamplona.....	27
3.2 Selección de la ubicación para el sistema de entrenamiento solar	27
3.3 Diseño del sistema de entrenamiento	29
3.3.1 Ángulo de inclinación.....	29
3.3.2 Ángulo de azimut.....	29
3.4 Modelado del sistema (simulación en Python)	30
3.5 Diseño del prototipo del sistema de entrenamiento solar 3D.....	35
4. Resultados.....	36
4.1 Resultados del ángulo de azimut.....	39
4.2 Resultados del ángulo de inclinación.....	42
4.3 Simulación anual con los ángulos de azimut e inclinación.....	45
4.4 Simulación anual con 0° de inclinación	46
4.5 Mediciones reales del módulo fotovoltaico.....	46
5. Conclusiones, propuestas y recomendaciones.....	49
6. Referencias	50
7.1 Código de la figura 18.....	54
7.2 Código de la gráfica 5.....	55
7.3 Código del ángulo de azimut	57
7.4 Código del ángulo de inclinación.....	59
7.5 Código de la energía mensual del año 2023	61

1. Introducción

Según la Organización de las Naciones Unidas hoy en día en el mundo la población ha superado los 8000 millones de personas en el mundo y durante los siguientes 30 años se estima que la población aumentará hasta los 9700 millones de personas (Unidas, 2023). Esto puede ser un problema energético pues a medida que la población mundial crece exponencialmente, el consumo energético de la sociedad aumenta en función a la población, esto se traduce a una producción de energía cada vez mayor. Este es un problema del que todos debemos estar preocupados, pues nuestros principales suministros de energía son derivados de los combustibles fósiles. A primera vista puede parecer que el único problema de depender de los combustibles a base de restos fósiles es la emisión de gases de efecto invernadero.

Naturalmente estos gases existen en el ciclo actual, la situación se torna delicada cuando saturamos el ciclo actual con CO₂ de ciclos pasados, contribuyendo a la contaminación del aire y al aumento de la temperatura mundial. Sin embargo, estos no son los únicos problemas que se obtiene de la explotación de los combustibles a base de restos orgánicos. (Ballenilla, 2005)

La escasez del petróleo y derivados de restos fósiles sugiere una regresión social como lo explica la teoría de Olduvai. Esta teoría establece que a partir de la revolución industrial la humanidad tiene los días contados, pues es verdad que los combustibles fósiles han permitido a la humanidad tener un avance tecnológico increíble en unos pocos años a comparación de toda nuestra historia. Olduvai postula la pregunta “¿Qué pasaría si se agotan los combustibles fósiles?” Pues se cree que si no hallamos la solución a un sustituto de este preciado combustible la sociedad no tendría la energía a la que está acostumbrada y por lo tanto colapsaría, teniendo una regresión social a una época en la que la humanidad no contaba con estos combustibles y sería imposible regresar al punto en el que estamos. (Duncan, 2007).

Por estas razones es urgente encontrar la solución al uso excesivo de los combustibles fósiles, claro que se han explorado otras fuentes de energía de origen natural e inagotables, las tan famosas energías renovables, sin embargo, nuevamente surgen más problemas y es que en la actualidad las energías renovables no pueden competir contra los combustibles fósiles.

Según la SENER (Secretaría de Energía) las energías renovables únicamente contribuyen un 14.68% de la energía total consumida en el mundo (Energía, 2022).

En este contexto es de primera necesidad seguir avanzando en el estudio de las energías renovables para hacerlas más eficientes frente a los combustibles fósiles.

Las energías renovables son muchas y muy distintas como la energía solar, energía eólica, energía térmica, biomasa, hidrogeno etc. Cada una de ellas contribuyen con un grano de arena para solventar la demanda energética, aunque aún no es suficiente.

Dentro de las energías renovables hay una con mayor popularidad que otras, debido a la facilidad y accesibilidad de uso. Se trata de la energía solar fotovoltaica la cual utiliza la energía solar, presente en todo el planeta, para transformarla en energía eléctrica.

Nuevamente se presenta un problema mencionado anteriormente y se trata de la baja eficiencia energética de los paneles fotovoltaicos. Es necesario el progreso en esta tecnología, dada la popularidad de esta. Aquí surge otro problema. Muchos centros educativos como universidades no cuentan con módulos solares para que los alumnos de dichas instituciones puedan aprender acerca de esta valiosa tecnología y poner en práctica el sustento teórico aprendido.

1.1 Planteamiento del problema

La energía solar es la energía limpia más comercial, popular y barata que existe en la actualidad por la gran presencia solar que existe en el planeta, aunque no funciona de la misma manera en todos los lugares de la tierra. La eficiencia con que se convierte la energía solar en eléctrica depende de la orientación de los paneles frente al sol. Debido a la inclinación de la rotación respecto a la traslación terrestre de 23.27° , en la zona cercana al ecuador el sol varía entre los hemisferios norte y sur a lo largo del año, por esta razón se complica el cálculo para obtener los ángulos correctos de orientación de los módulos fotovoltaicos para una generación óptima, lo cual provoca que la conversión de energía solar en energía eléctrica no sea siempre favorable, ya que depende de la orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos.

La Universidad de Pamplona carece de módulos de entrenamiento solar para los alumnos de la institución, y ya que la universidad está ubicada en Pamplona, Norte de Santander, Colombia, la cual se encuentra a aproximadamente 819 km de la línea de ecuador, sugiere el reto por la orientación óptima de los paneles solares si es que se requiere obtener una conversión energética más eficiente a lo largo del año.

1.2 Justificación

Los avances de la energía solar han convertido en una energía comercial abaratando costos de estas tecnologías siendo un aporte mayor cada día. Sin embargo, un obstáculo a considerar al implementar los módulos fotovoltaicos suele ser la orientación. Un factor importante que

se debe considerar porque de esto dependerá la eficiencia energética del sistema solar. Este es uno de los desafíos que se enfrentan los módulos que son implementados en la región cercana al ecuador a consecuencia de la variación solar en la zona.

Pamplona se haya a menos de 1000 km de la línea de ecuador y el problema se presenta en la zona, por ello es necesario conocer los ángulos a los que se deben orientar los paneles solares para maximizar la producción de los paneles. Esta es la razón de realizar una simulación de la posición solar anual y una evaluación con los ángulos posibles de los paneles mediante un código computacional.

El proyecto busca implementar dicha simulación por un código de Pvlib en lenguaje Python incluyendo librerías propias de Pvlib para simular la variación solar a lo largo del año.

Con ello el diseño de los módulos fotovoltaicos para entrenamiento asegura una conversión eficiente de energía. Estos módulos de entrenamiento solar presentan la facilidad y disposición de paneles fotovoltaicos para realizar prácticas e impulsar el desarrollo e investigación de la energía solar. La enseñanza y aprendizaje de la energía solar mediante estos módulos de entrenamiento permite a los estudiantes aplicar la teoría y desarrollar habilidades prácticas formando ingenieros más competentes.

1.3 Antecedentes

Los bancos de pruebas solares son una herramienta que se ha venido popularizando para el desarrollo y aprendizaje de los estudiantes de esta energía. Los autores Diego Matiz y John Macareno presentan un caso de éxito con su investigación al diseñar e implementar un módulo de entrenamiento solar didáctico para la Universidad De Santander (UDES).

El sistema solar fotovoltaico está equipado con un controlador de carga, inversor, paneles solares de 130 W, baterías, y hardware y software destinado al control de la potencia generada por los paneles, además de incluir un router para el monitoreo remoto del sistema.

A pesar de que el enfoque de proyecto es la implementación de software y hardware de control para un sistema solar, los autores logran implementar un módulo funcional didáctico de entrenamiento para los alumnos de ingeniería de dicha institución (Matiz Mora & Macareno Carrillo, 2019).

En la región cercana a la línea de ecuador sucede algo curioso con la orientación de los paneles solares, pues en el hemisferio norte de la tierra los paneles se orientan hacia al sur, y viceversa con el hemisferio sur donde se orientan hacia el norte apuntando a la línea del

ecuador. Es correcto mencionar que el sol sale del este y se oculta en el oeste, pero manteniendo una trayectoria cercana a la línea del ecuador y variando entre hemisferios a lo largo del año, explica German Alfredo Mora Trujillo quien expresa este fenómeno en su investigación: “Características energéticas de una placa fotovoltaica, por variación de ángulo de inclinación, frente a la radiación solar en Ecuador” (Mora Trujillo, 2015).

Tomando esto en cuenta, en esta región esto puede parecer un problema, pues hay estaciones del año en donde el sol cambia de orientación variando ligeramente entre el sur y el norte del ecuador.

Algunos autores como Brenda Samara Cárdenas Dulcey la cual propuso un diseño para alumbrado público en la avenida 7 y 7ª entre la redoma monumento al Indio y la avenida Libertadores de la ciudad de San José de Cúcuta. Se percataron del fenómeno de la oscilación solar y por ello propuso que los módulos solares tuvieran una inclinación de 0° , de esta manera descarta el ángulo de azimut para poder aprovechar la radiación solar en todo el año, aunque se encuentre por encima de la línea del ecuador (Cárdenas Dulcey, 2016).

Por otro lado, la autora Stephanie Carolina Martínez Romero quien realizó el diseño para un sistema fotovoltaico aislado en el estado de Falcon, Venezuela, comprende que un módulo solar podría llegar a alcanzar mayor generación anual si se tienen ángulos óptimos para la captación solar, aunque en cierta temporada del año se reduzca la producción del panel debido a la falta de la incidencia directa del sol (Martínez Romero, 2016)

1.4 Objetivo

Determinar el posicionamiento óptimo de módulos fotovoltaicos para un sistema de entrenamiento solar en el edificio Simón Bolívar de la Universidad de Pamplona, mediante simulaciones en lenguaje Python.

1.4.1 Objetivos específicos

- Analizar las posibles sombras proyectadas en el techo del edificio Simón Bolívar en la Universidad de Pamplona

- Determinar los ángulos óptimos de inclinación y azimut de los módulos fotovoltaicos para una mayor eficiencia energética aplicando códigos de programación para simulación
- Evaluar el desempeño de los módulos fotovoltaicos con los ángulos óptimos obtenidos de la simulación

2. Fundamentos

2.1 Radiación

Es la propagación de la energía a través de partículas u ondas electromagnéticas en el espacio por medio del vacío o por algún otro medio. Según la cantidad de energía emitida esta puede pertenecer a cierta categoría o región del espectro electromagnético (Pareja Aparicio, 2010)

2.1.1 Radiación solar

La energía del sol emitida en forma de radiación por medio de ondas electromagnéticas. Estas ondas electromagnéticas corresponden la radiación: infrarroja, luz visible y radiación ultravioleta.

Al llegar la radiación solar a la tierra llega en una menor cantidad aproximadamente 1360 W/m^2 fuera de la tierra. La capa atmosférica debilita la radiación solar, por lo que en la superficie terrestre la radiación es de 1000 W/m^2 . La radiación solar consiste en tres tipos:

Radiación directa: Radiación que llega sin obstáculos a la tierra.

Radiación difusa: Radiación que sufrió cambios en su dirección por la atmosfera terrestre.

Radiación Albedo: Radiación reflejada por el suelo o alguna estructura.

A la radiación que incide sobre una superficie se le determina con el concepto de *irradiancia* y se expresa en W/m^2 . Por otro lado, a la energía solar que incide sobre una superficie se le conoce como *irradiación* que se expresa como Wh/m^2 o J/m^2 . (Pareja Aparicio, 2010).

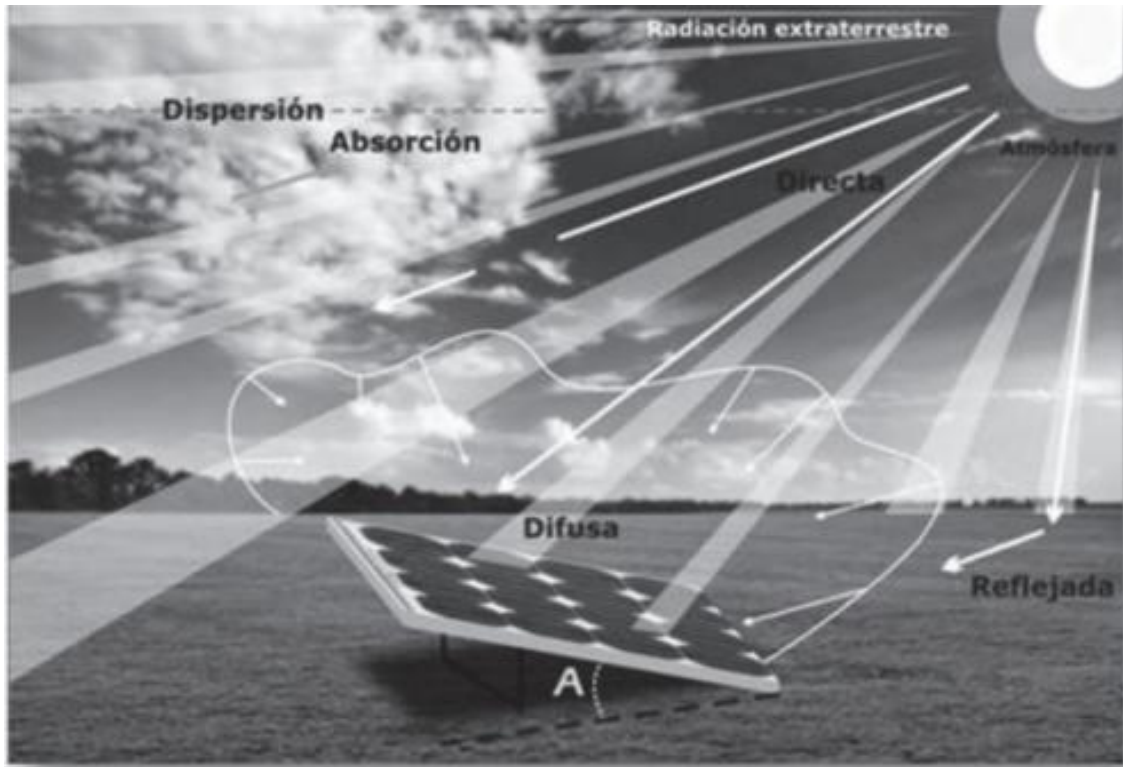


Figura 1. Radiación solar (Pareja Aparicio, 2010).

2.1.2 Radiación total

Generalmente es la radiación directa es la que incide sobre las superficies y es la que genera más energía en un panel solar, sin embargo, cuando las condiciones climatológicas no permiten la incidencia directa de la radiación sobre un panel solar, es la radiación difusa la que llega a los paneles. Es el conjunto de los 3 tipos de radiación que da como resultado una radiación total, como se muestra en la *Figura 1*. (Pareja Aparicio, 2010)

$$\text{Radiación total} = \text{radiación directa} + \text{radiación difusa} + \text{radiación albedo}$$

Ecuación 1. Radiación total

2.1.3 Radiación de cuerpo negro

Un cuerpo idealmente negro absorbe con totalidad la radiación que incide sobre el cuerpo, lo que provoca que aumente la temperatura y, por ende, irradiará energía escalonando a través del espectro electromagnético (Duarte, Núñez, Salmantón, & Pazos, 2022).

2.1.4 Ley de desplazamiento de Wien

Wilhelm Wien al observar el comportamiento de los radiadores de cuerpo negro, establece la relación que existe entre la temperatura y la luz emitida por un cuerpo negro (Zamora Ramos).

$$\lambda_{max} = \frac{\delta}{T}$$

Ecuación: 2 Ley de Wien (Térmica, s.f.)

Donde:

λ_{max} = Longitud de onda de la radiación emitida por el cuerpo negro

δ = Constante de Wien ($2.898 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$)

T = temperatura del cuerpo negro en K

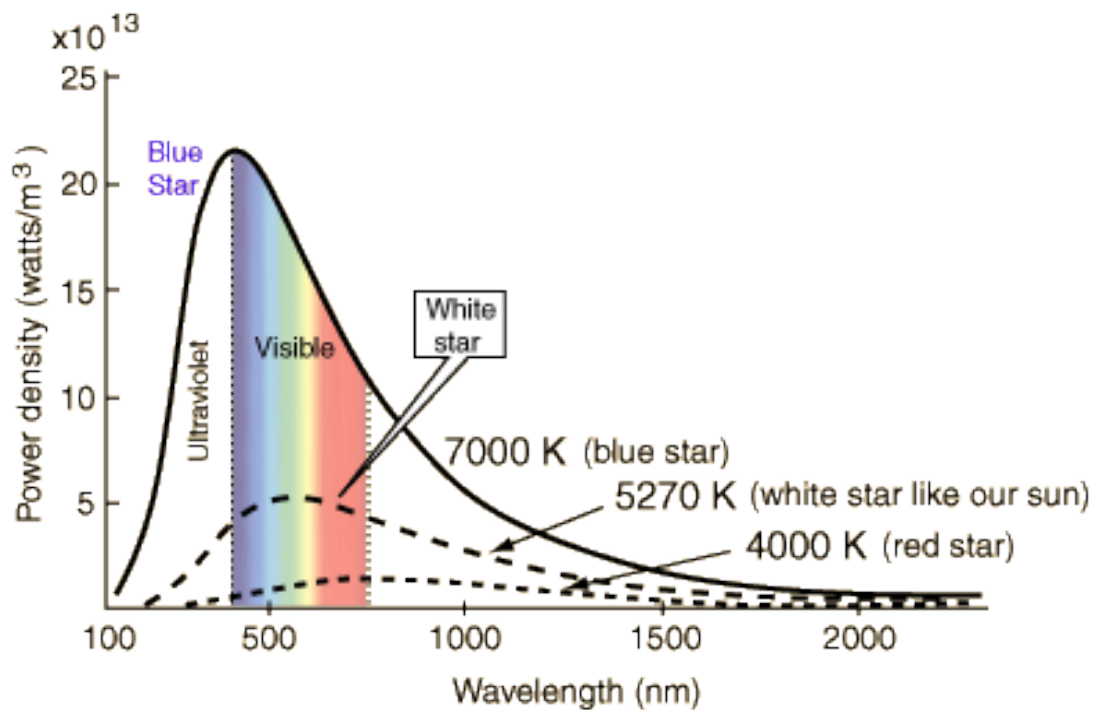


Figura 2. Temperaturas de estrellas. (EcuRed, 2013)

La Figura 2 representa el espectro de radiación de cuerpo negro para diferentes temperaturas de las estrellas, donde el eje X se trata de la longitud de onda (nm) emitida por la estrella, mientras que el eje Y la densidad de potencia (W/m^3).

2.2 Espectro electromagnético

La emisión de energía en forma de radiación electromagnética es la forma en la que el sol emite energía. La radiación electromagnética consta de varios tipos o regiones según la cantidad de energía emitida, la cual es inversamente proporcional a la longitud de onda de esta misma. Las ondas electromagnéticas es la unión de tanto de ondas eléctricas como de ondas magnéticas con un ángulo recto entre sí con respecto a la dirección de propagación, como se muestra en la *Figura 3*. (Fontal, 2005)

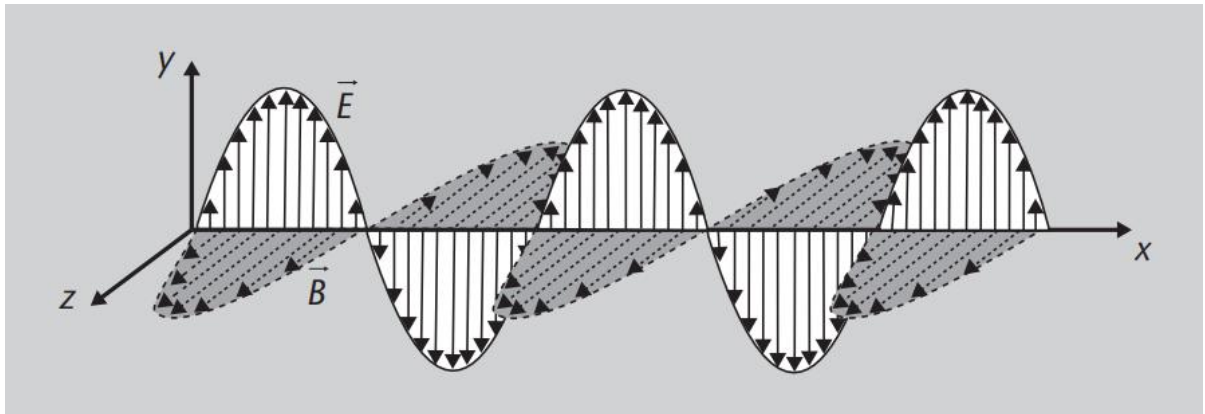


Figura 3. Ondas electromagnéticas (Perez Navarro, 2020)

La radiación electromagnética se divide en 7 tipos:

Tabla 1. Regiones del espectro electromagnético (Perez Navarro, 2020)

Región	Frecuencia (Hz)	Longitud de onda (m)	Energía del fotón (eV)
Rayos gamma	$10^{22} - 10^{19}$	$10^{-11} - 10^{-14}$	10^{10}
Rayos X	$10^{17} - 10^{19}$	$10^{-8} - 10^{-11}$	10^5
Ultravioleta	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	10^3
Visible	$10^{14} - 10^{15}$	$10^{-5} - 10^{-6}$	1
Infrarrojo	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{-3} - 10^{-5}$	10^{-3}
Microondas	$10^9 - 10^{11}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	10^{-5}
Ondas de radio	$10^3 - 10^9$	$10^3 - 10^{-1}$	10^{-10}
Corriente alterna	$10^2 - 10^3$	$10^7 - 10^3$	10^{-15}

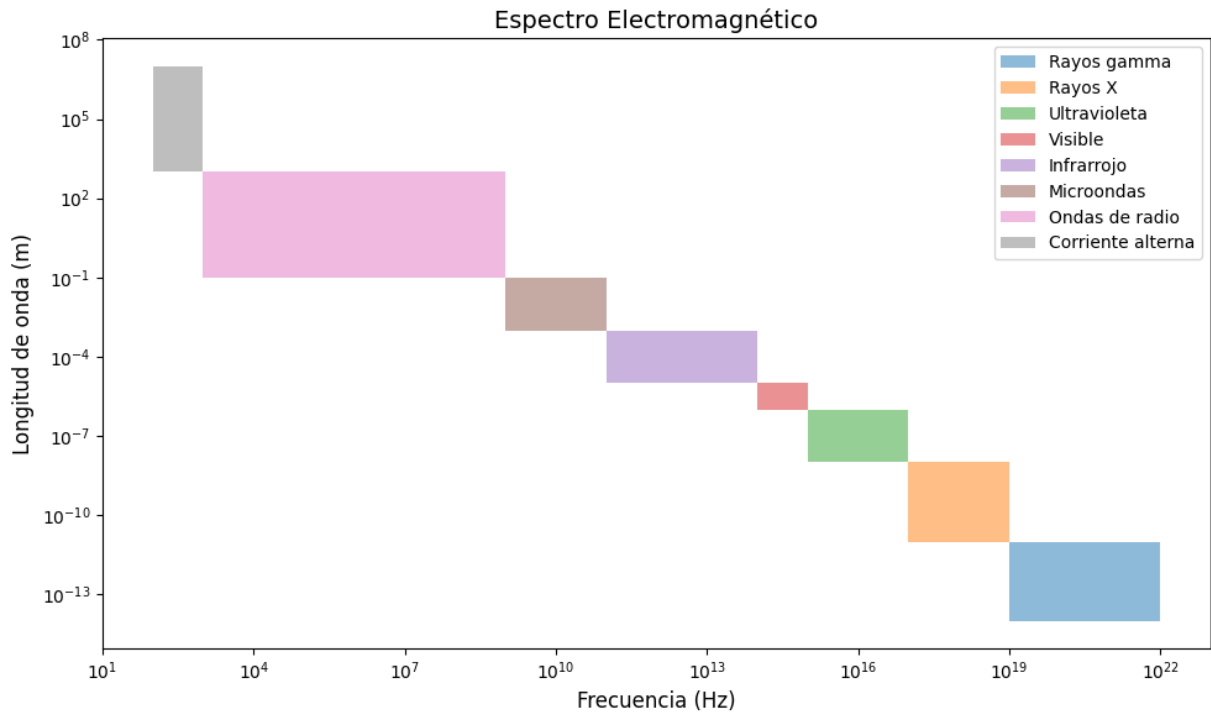


Figura 4. Espectro electromagnético (generado por código de Python)

2.2.1 Espectro solar terrestre

Es la radiación electromagnética emitida por el sol que viaja a través del espacio hasta llegar a la tierra. La radiación que llega a la tierra corresponde a las regiones: Ultravioleta 7%, luz visible 47% e infrarrojo 46%. (Japuntes, 2022)

2.3 Efecto fotoeléctrico

La dualidad onda-partícula de Broglie establece que las partículas pueden comportarse también como ondas electromagnéticas. Albert Einstein observó que, al irradiar luz sobre una placa metálica, esta emitirá electrones que depende de la frecuencia de la luz y no de la intensidad de esta. Los electrones externos de los átomos de un material al adquirir la energía de los fotones irradiados, salen expulsados a determinada longitud de onda de menor cantidad que el de la luz incidente, a este fenómeno se le conoce como efecto eléctrico. (Rodríguez Meza & Cervantes-Cota, 2006)

2.3.1 Energía del fotón

Los fotones emitidos por la radiación solar que atraviesa la atmosfera terrestre contienen energía que pertenece a diversas regiones del espectro electromagnético. Max Planck determinó que la energía contenida por un fotón se calcula con la siguiente ecuación.

$$E = h \times f$$

Ecuación 3. Energía del fotón

(Grave-Capistrán, García León, & Quintero-Quintero, 2019)

Donde:

E= Energía del fotón

h= Constante de Planck ($6.26 \times 10^{-34} J$)

f= frecuencia de la onda asociada al fotón.

Solo determinados fotones pueden ser aprovechados por los semiconductores para producir energía eléctrica en las celdas solares por medio del efecto fotovoltaico.

2.4 Semiconductores

Los sólidos pueden consolidarse en tres tipos según sus propiedades de conducción eléctrica; aislantes, conductores y semiconductores. Estos se clasifican según la distancia de separación entre la banda de valencia y la banda de conducción de los átomos.

2.4.1 Teoría de bandas

La separación entre las bandas de valencia y de conducción se le conoce como band gap o banda prohibida y se mide en eV. En los materiales conductores el band gap es de poca energía, por ende, el espacio entre bandas es pequeño y los electrones tienen mayor fluidez al saltar entre bandas, siendo más fácil generar una corriente eléctrica. Por otro lado, en los materiales aislantes sucede lo opuesto, el band gap tiene más energía, las bandas están más separadas y el salto de electrones es mínimo. Por otra parte, los semiconductores tienen la distancia precisa para exista o no el salto de electrones dependiendo de las condiciones a las que se encuentre el semiconductor. (Rodríguez, 2001)



Figura 5. Esquema de bandas en aislantes, semiconductores y conductores respectivamente.

2.4.2 Semiconductores intrínsecos y extrínsecos

Los semiconductores intrínsecos son aquellos cuyos electrones de valencia forman enlaces covalentes y existen tres tipos de semiconductores intrínsecos, el grupo 4A, grupo 3A-5A y el grupo 2A-6A estos nombres hacen alusión a la posición de los elementos que lo conforman en la tabla periódica. Para que exista un enlace covalente los átomos deben poseer 4 electrones de valencia para cumplir la regla del octeto de Lewis, estos átomos se encuentran en el grupo 4A de la tabla periódica, sin embargo, también es posible obtener estos enlaces si se forman moléculas de átomos en los grupos 3A-5A y 2A-6A.

Tabla Periódica de los elementos

Grupo	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A
1A	H (1.01)							
2A		Li (6.94)	Be (9.01)					
3A			Na (22.99)	Mg (24.31)				
4A				K (39.10)	Ca (40.08)			
5A					Rb (85.47)	Sr (87.62)		
6A						Cs (132.91)	Ba (137.33)	
7A							Fr (223)	Ra (226)
8A								
9A								
10A								
11A								
12A								
13A								
14A								
15A								
16A								
17A								
18A								
19A								
20A								
21A								
22A								
23A								
24A								
25A								
26A								
27A								
28A								
29A								
30A								
31A								
32A								
33A								
34A								
35A								
36A								
37A								
38A								
39A								
40A								
41A								
42A								
43A								
44A								
45A								
46A								
47A								
48A								
49A								
50A								
51A								
52A								
53A								
54A								
55A								
56A								
57A								
58A								
59A								
60A								
61A								
62A								
63A								
64A								
65A								
66A								
67A								
68A								
69A								
70A								
71A								
72A								
73A								
74A								
75A								
76A								
77A								
78A								
79A								
80A								
81A								
82A								
83A								
84A								
85A								
86A								
87A								
88A								
89A								
90A								
91A								
92A								
93A								
94A								
95A								
96A								
97A								
98A								
99A								
100A								
101A								
102A								
103A								
104A								
105A								
106A								
107A								
108A								
109A								
110A								
111A								
112A								
113A								
114A								
115A								
116A								
117A								
118A								

Figura 6. Formación de semiconductores intrínsecos.

Los semiconductores intrínsecos pueden efectuar una corriente eléctrica liberando un electrón al suministrar energía en forma de calor, sin embargo, debido a la estabilidad de su estructura no se considera que tengan aplicaciones prácticas.

Por otro lado, existen los semiconductores extrínsecos los cuales incluyen en su estructura átomos algún átomo ajeno a su grupo, rompiendo con la estabilidad de los enlaces covalentes habiendo electrones libres que fungen como negativos o huecos positivos. (Leñero Bardallo)

2.4.3 Dopaje N y P

Se le conoce como dopaje a las impurezas existentes en las estructuras de los semiconductores, estas impurezas se denominan N o P dependiendo del elemento del que se trate, por ejemplo. Sí en una red cristalina de silicio que posee 4 electrones de valencia por átomo se le agrega un elemento pentavalente, la red tendrá un electrón libre, y ya que los electrones son partículas negativas, el dopaje es tipo N. Lo mismo ocurre con el dopaje tipo P, al agregar un elemento trivalente, la red poseerá un hueco el cual rompe su estabilidad creando un flujo de electrones. (Rodríguez, 2001)

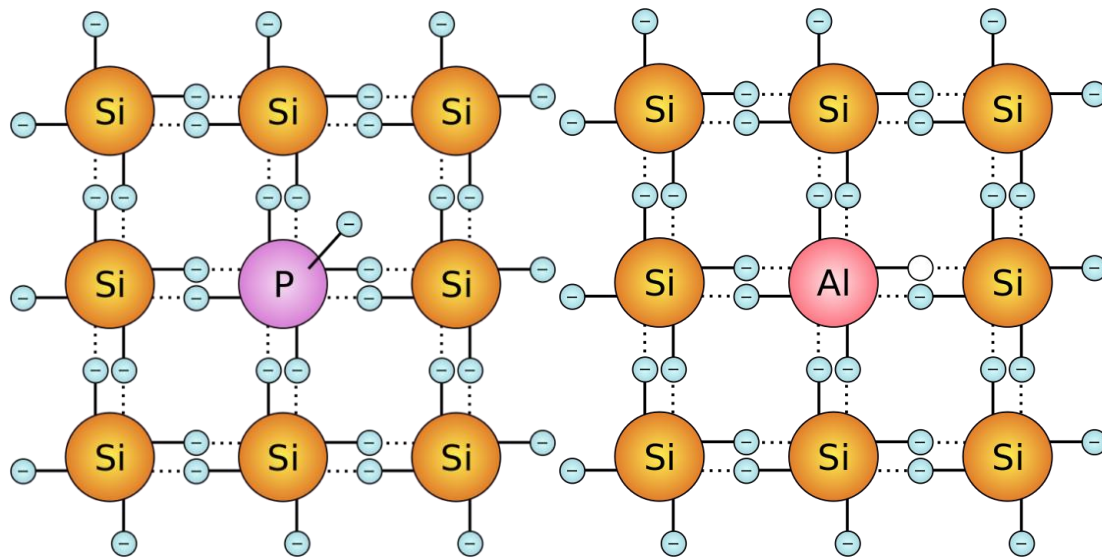


Figura 7. Dopaje N y P respectivamente. (Tomé López, 2020)

2.4.4 Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico surge a partir del efecto fotoeléctrico con la diferencia que la energía es parcialmente emitida en un flujo eléctrico. La radiación electromagnética solar incidente sobre la capa N de la juntura NP romperá los enlaces covalentes liberando electrones en la red cristalina aumentando la carga negativa en la zona N, esto creará una diferencia de

potencial entre ambas capas N y P. Al cerrar el circuito las placas de los paneles solares se crea una corriente eléctrica. Mientras más radiación incide sobre la capa N, mayor será la diferencia de potencial. (Mesa, Escobar Mejia, & Hincapie Isaza, 2009)

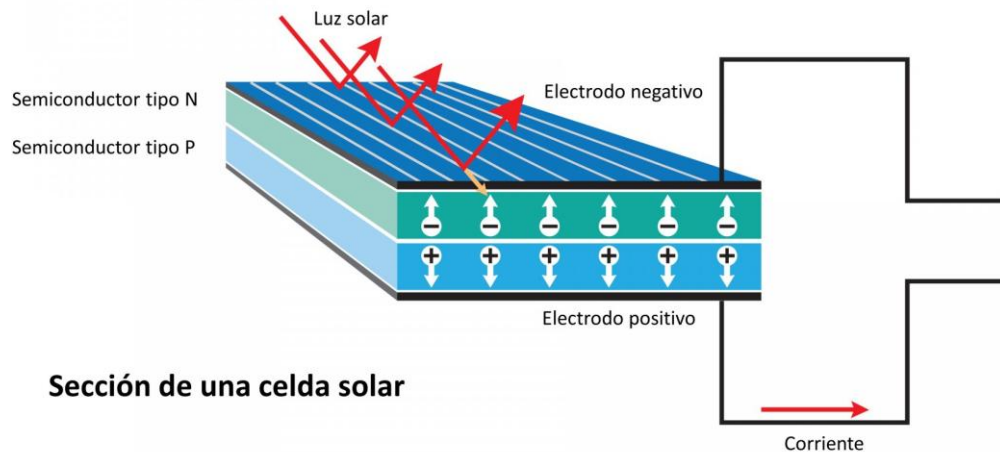


Figura 8. Principio de funcionamiento del efecto fotovoltaico. (Mayo, 2019)

2.5 Modulo fotovoltaico

Un dispositivo capaz de convertir la radiación solar incidente o reflejada en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico también conocidos como paneles solares.

Está compuesto de celdas solares de algún material semiconductor, generalmente son de estructuras cristalinas. Comercialmente son fabricadas de Silicio por la alta cantidad existente del elemento en el planeta, aunque también existen módulos fotovoltaicos de otros materiales semiconductores con aplicaciones no comerciales. (Higuera Valenzuela)

2.5.1 Celda Solar

Son dispositivos cristalinos semiconductores los cuales forman paneles solares en conjunto. Debido a sus propiedades ópticas semiconductoras son excelentes en aplicaciones fotovoltaicas. (Higuera Valenzuela)

Existen dos cristales de Silicio con aplicaciones fotovoltaicas; Silicio policristalino y monocristalino cuya diferencia principal radica en la eficiencia superior y vida útil de las celdas monocristalinas y en el bajo costo de producción de las celdas policristalinas. Aunque también existen celdas de Silicio amorfo que pese a tener baja eficiencia su bajo costo le permite una producción en masa.

Las celdas solares están construidas de tal forma que sea posible aprovechar la energía incidente en ellas y transportar el flujo eléctrico generado. Su estructura está conformada por:

Sustrato: Base de las celdas y funge como aislante.

Placa metálica: Sirve como conductor de la electricidad generada por la celda.

Capa N: Contiene electrones libres

Capa P: Contiene huecos

Unión NP: la juntura de los electrones en la capa N y los huecos de la capa P generan un campo que separa a los electrones de los huecos terminando en una corriente eléctrica. (Higuera Valenzuela).

2.5.2 Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico está compuesto de diversos dispositivos capaces de gestionar la energía eléctrica generada por los paneles solares para ser aprovechada por electrodomésticos u otros aparatos eléctricos. Dichos sistemas pueden estar conformados por:

Inversor:

Dispositivo capaz de convertir la corriente directa (DC) en corriente alterna (AC) conmutando y corrigiendo la frecuencia de la señal para que cualquier equipo de corriente alterna pueda conectarse en el inversor y usar la energía generada de los paneles. Existen modelos capaces de conectarse a la red eléctrica para suministrar electricidad generada de los paneles.

Controlador de carga

Para mantener bajo control la energía suministrada a las baterías se debe utilizar un controlador de carga. Su función es transferir la corriente eléctrica rectificada dentro de los parámetros seguros de carga de la batería para prolongar la vida útil de las baterías.

Batería

Dispositivo capaz de almacenar la energía eléctrica mediante reacciones químicas a base del intercambio de electrones en procesos de oxidación y reducción de ácido sulfúrico. Generalmente son utilizadas en lugares donde no hay disponibilidad de la red eléctrica para alimentar a los aparatos eléctricos, las baterías se cargan durante el día cuando existe la producción de energía solar y se utilizan durante la noche. (Perpiñán Lamigueiro, 2013)

2.5.3 Sistema aislado

Sistema aislado de la red eléctrica y su funcionamiento se basa enteramente de la producción de los paneles solares. La corriente de los paneles es suministrada al regulador de carga para rectificar la señal directa del panel y posteriormente al inversor para aplicar alguna carga o hacia las baterías. (Perpiñán Lamigueiro, 2013)

Tabla 2. Ventajas y desventajas del sistema aislado

Sistema fotovoltaico aislado	
Ventajas	Desventajas
Independencia de la red eléctrica	Mantenimiento a las baterías
Retorno de inversión claro	Costo alto de las baterías
Puede usarse como sistema de respaldo	Corta vida útil de las baterías
Energía limpia	Dependencia total del clima
Autónomo	Consumo limitado

2.5.4 Sistema interconectado a red

La energía generada de los paneles es suministrada hacia un inversor central o micro inversor para ser utilizada por la carga de un hogar, comercio o industria. El medidor bidireccional se encarga de inyectar la energía no consumida de los paneles a la red eléctrica para posteriormente ser nuevamente suministrada por las noches a la carga. (Perpiñán Lamigueiro, 2013)

Tabla 3. Ventajas y desventajas del sistema interconectado a red

Sistema fotovoltaico interconectado a red	
Ventajas	Desventajas
Retorno de inversión claro	Restringido a la distribución de la red eléctrica
No necesita baterías	Inversión alta
Energía continua	Requiere instalación profesional
Bajo mantenimiento	Tramites de interconexión

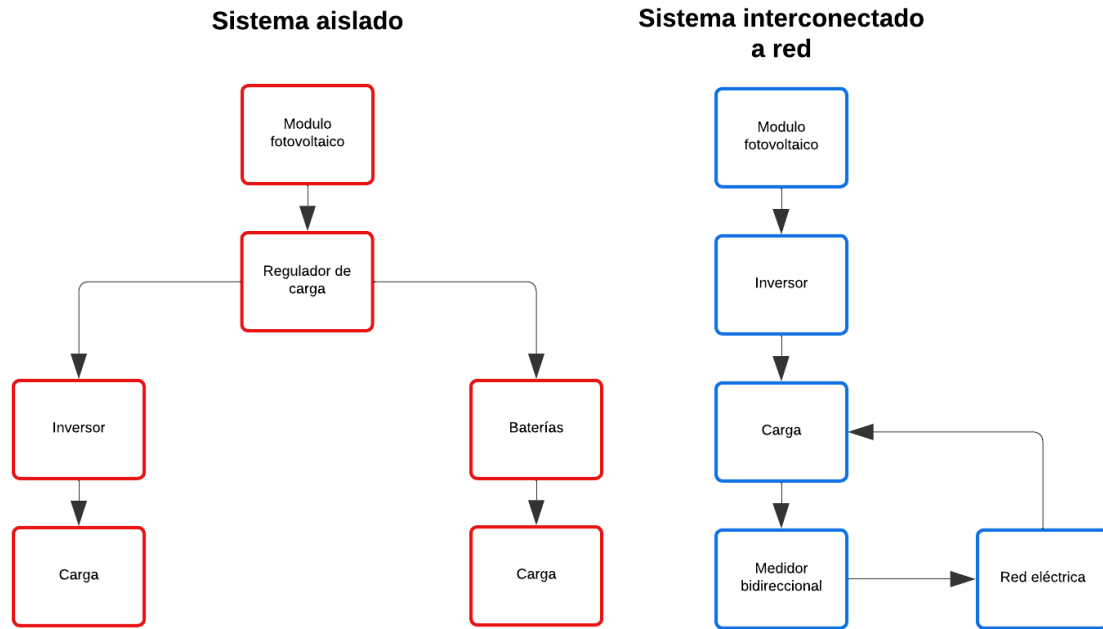


Figura 9. Diagrama de sistema fotovoltaico aislado e interconectado a red

2.5.5 Conexión serie y paralelo

Existen tres formas de conectar entre sí los módulos fotovoltaicos; serie, paralelo y combinado serie-paralelo. Al conectar los paneles en serie se suma el voltaje y se mantiene la corriente.

$$V_t = V_1 + V_2$$

Ecuación 1. Voltaje en serie

$$I_t = I_1 = I_2$$

Ecuación 1. Corriente en serie.

En paralelo sucede lo opuesto a serie, aumenta la corriente mientras que el voltaje se mantiene.

$$I_t = I_1 + I_2$$

Ecuación 3. Corriente en paralelo

$$V_t = V_1 = V_2$$

Ecuación 4. Voltaje en paralelo

Combinando los modos serie y paralelo podemos aumentar tanto el voltaje como la corriente.

En realidad, no existe el modo correcto de conectar entre sí los paneles solares, sino que depende de las características requeridas del sistema, además de que existen inversores que funcionan únicamente bajo ciertas condiciones.

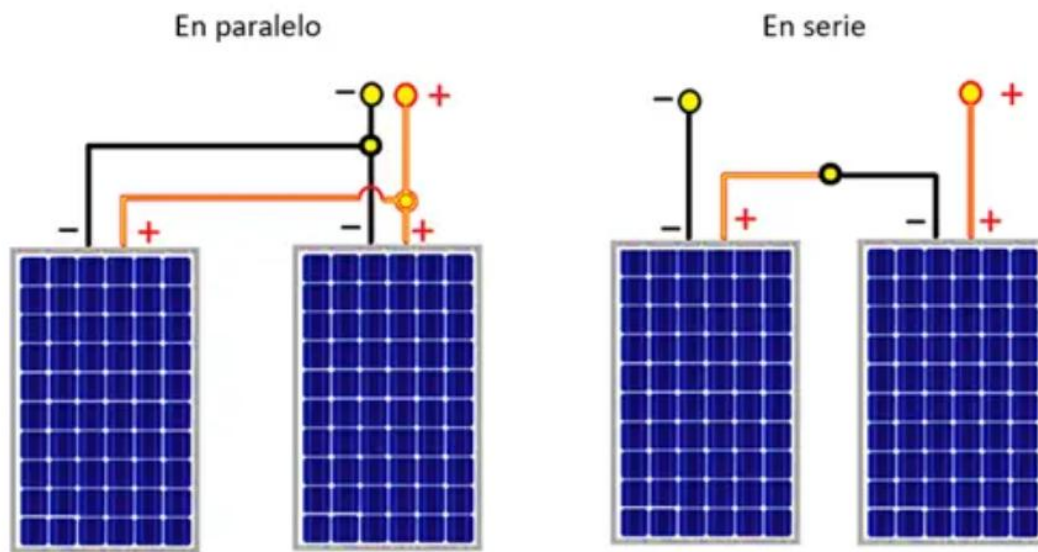


Figura 10. Conexión en paralelo y serie (Muñoz, 2023)

2. 6 Módulo de entrenamiento solar

Un sistema solar fotovoltaico diseñado para realizar prácticas de los alumnos en universidades y otros centros educativos. Un diseño simple que permite a los alumnos conocer y comprender la energía solar fomentando el uso de esta misma. Los alumnos al interactuar con este módulo de entrenamiento desarrollan habilidades para el futuro laboral con un entorno más realista que solo la teoría. El objetivo de estos módulos no es la generación de energía sino la capacitación de los alumnos. (Cevallos Ulloa, Lindao Fiallos, & Layana Castro)

2.7 Conceptos solares

2.7.1 Ángulo de inclinación y azimut

El ángulo de azimut es la dirección del sol como brújula respecto a un origen donde 0° es el norte y 180° el sur, este ángulo varía según la hora y la estación del año, los paneles solares se deben posicionar a donde mayor predominancia tenga el ángulo de azimut solar. (Vega de Kuyper & Ramírez Morales, 2014)

LSTM (hora estándar local del meridiano)

$$LSTM = 15^\circ * \Delta T_{GMT}$$

Ecuación 5. Hora estándar local del meridiano

Donde:

ΔT_{GMT} = Diferencia de la Hora local (LT) de Greenwich Tiempo medio (GMT) en horas.

Ecuación del tiempo

$$E_0T = 9.87 \sin(B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B)$$

Ecuación 6. Ecuación del tiempo

Donde:

E_0T = Corrección a la hora solar con respecto a la hora "civil".

Su comportamiento senoidal se debe a la inclinación del eje terrestre mientras que el cosenoidal a la excentricidad orbital de la tierra.

$$B = \frac{360}{365} (d - 81)$$

Ecuación 7. Corrección del tiempo E_0T

Factor de corrección de tiempo

$$TC = 4(Longitud - LSTM) + E_0T$$

Ecuación 8. Factor de corrección de tiempo

Tiempo solar local

$$LST = LT + \frac{TC}{60}$$

Ecuación 9. Tiempo solar local

Ángulo horario

$$HRA = 15^\circ (LST - 12)$$

Ecuación 10. Ángulo horario

Declinación solar:

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[\frac{360}{365} (d - 81) \right]$$

Ecuación 11. Declinación solar

Elevación

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin(\delta) * \sin(\phi) + \cos(\delta) * \cos(\phi) * \cos(HRA)]$$

Ecuación 12. Elevación solar

Ángulo de azimut

$$Azimut = \cos^{-1} \left[\frac{\sin(\delta) * \cos(\phi) - \cos(\delta) * \sin(\phi) * \cos(HRA)}{\cos(\alpha)} \right]$$

Ecuación 13. Ángulo de azimut

Donde:

Φ =Latitud del lugar

Mientras que el ángulo de inclinación es el ángulo inclinado de un panel respecto al eje horizontal y debe ser orientado a la latitud del sitio. (Solis, 2022)

$$\beta_{opt} = 3.7 + (0.69 * \Phi)$$

Ecuación 5. Ecuación del ángulo de inclinación

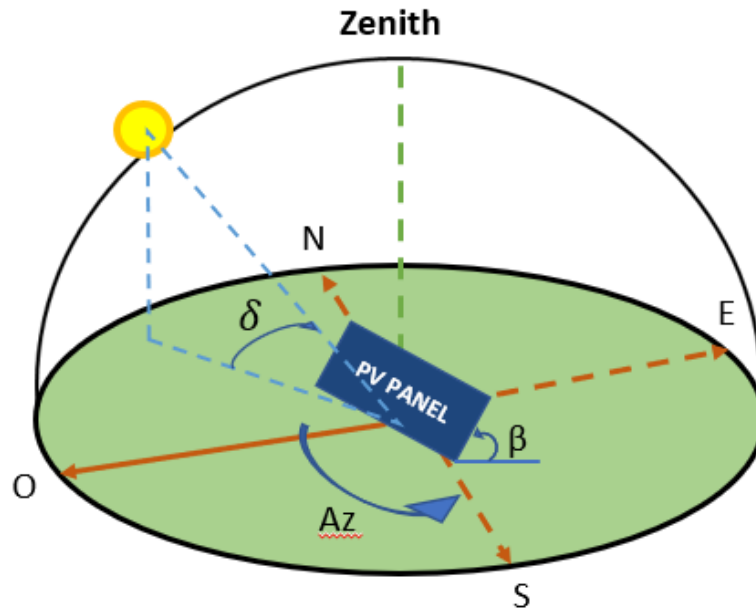


Figura 11. Diagrama de orientación del panel.

Donde:

β : ángulo de inclinación.

Az : Am: ángulo de azimut.

δ : Declinación solar.

2.7.2 Posición solar

Los movimientos de rotación y traslación de la tierra sobre el sol representan la trayectoria solar alrededor del año. Este movimiento se realiza sobre el eje horizontal que pertenece a la línea del ecuador. Este movimiento es de $23^\circ 27''$ ocasionando que no sea totalmente estable sobre la línea del ecuador y generando variaciones solares entre hemisferio norte y sur, y la declinación solar a lo largo del ciclo eclíptico. (Pareja Aparicio, 2010)

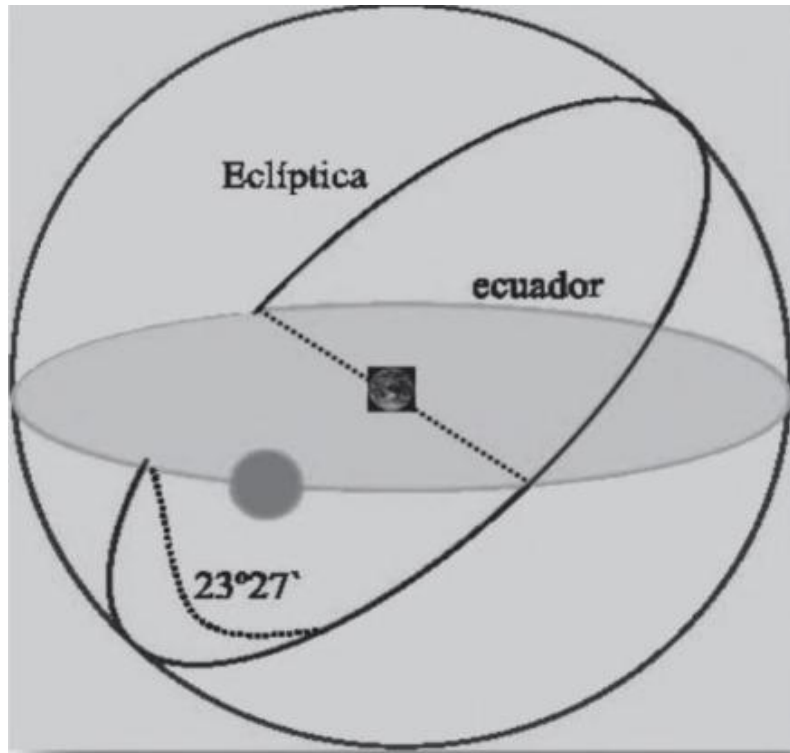


Figura 12. Posición solar respecto a la tierra. (Pareja Aparicio, 2010)

2.7.3 Declinación solar

Se declinación solar se refiere al ángulo de inclinación que tiene el sol respecto a un punto fijo en la tierra y al zenith, donde el zenith es 0° y el horizonte 90° . En realidad, este fenómeno se debe a la rotación solar y varía según la hora del día y la estación del año. (Honsberg & Bowden, s.f.)

2.7.4 Horas solar pico

Son las horas de aprovechamiento solar diarias. Lo correcto es realizar cálculos con la menor cantidad de horas de aprovechamiento solar del lugar y no con el promedio de horas, debido a que un sistema debe funcionar aún en las peores condiciones climatológicas. (Contreras, Galban, & Sepúlveda, 2018)

3. Descripción de las funciones específicas y globales desarrolladas

3.1 Recurso solar de Pamplona

Las condiciones solares en Pamplona, Norte de Santander, Colombia son aptas para la captación solar como se muestra en la *Figura 13* y *Tabla 4*. (PVGIS, 2015) (NASA Power Dav, s.f.)

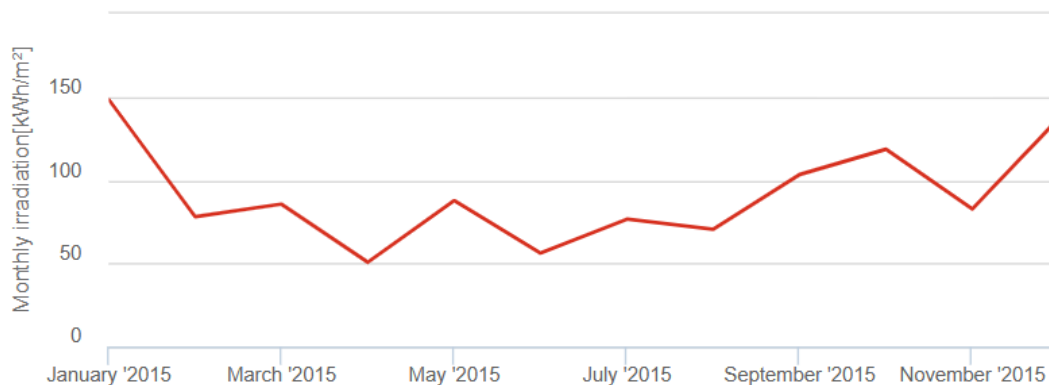


Figura 13. Irradiación solar anual en Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tabla 4. Datos solares de Pamplona

Datos Solares de Pamplona	
Irradiancia solar promedio	89 kWh/m ²
Horas solar pico	4.3 Hrs

Los valores fueron obtenidos de los softwares “PVGIS” y “Nasa Power Dav” los cuales cuentan con una interface intuitiva y simple para los usuarios.

Pamplona y en general toda la región del ecuador muestran una variación en la trayectoria solar entre el hemisferio norte y sur, por lo que posicionar los paneles de manera óptima en esta región puede parecer un problema.

3.2 Selección de la ubicación para el sistema de entrenamiento solar

La implementación de un sistema de entrenamiento solar en la Universidad de Pamplona podría tener una respuesta positiva de parte de los alumnos que desean aprender más acerca de esta tecnología, sin embargo, antes de proceder a la instalación de los módulos fotovoltaicos viene un diseño previo.

Para la selección de los paneles la Universidad de Pamplona proporcionó 6 paneles solares bifaciales, los cuales aprovechan la irradiancia solar reflejada por debajo del panel. Se tratan de los paneles solares LONGI LR5-72HBD-540M, cabe mencionar que los paneles fueron donados a la universidad sin fines de lucro.

Para la ubicación de los paneles se asignó un área específica sobre el edificio Simón Bolívar donde se encuentran los alumnos de ingeniería. El propósito es buscar un sitio en el cual no se proyecten sombras para maximizar la conversión de energía.

En el techo del edificio se encontraron proyecciones de sombra de los árboles y de estructuras que yacían en el edificio, pese a las sombras proyectadas en la ubicación propuesta para los paneles no se encuentra ninguna sombra.



Figura 14. Proyección de sombras en el edificio Simón Bolívar.

Tomando en cuenta las sombras sobre el edificio Simón Bolívar, se tuvieron que ubicar los paneles en donde no hubiera presencia de estas.



Figura 15. Ubicación de los paneles solares en el edificio Simón Bolívar

3.3 Diseño del sistema de entrenamiento

Para lograr ubicar los paneles adecuadamente según la región en la que se encuentra (cercana a la línea del ecuador) es necesario conocer los ángulos de inclinación y de azimut.

3.3.1 Ángulo de inclinación

Para determinar la inclinación de los paneles solares del sistema de entrenamiento se aplican las coordenadas del sitio de estudio (Arrieta Paternina, Olmos Villalba, Izquierdo Nuñez, & Álvarez López, 2012). Las coordenadas de Pamplona son: Latitud: 7.384452657385216, Longitud: -72.64785425931926. Siguiendo la siguiente ecuación:

$$\beta_{opt} = 3.7 + (0.69 * \sigma)$$

Ecuación 4. Ángulo de inclinación

Donde:

σ = Latitud del sitio

Sustituyendo σ por la latitud 7.3° obtenemos que la inclinación óptima para Pamplona, Norte de Santander, Colombia es: $\beta_{opt} = 8.7^\circ$

3.3.2 Ángulo de azimut

No existe una fórmula para encontrar el ángulo de azimut óptimo a lo largo del año y requiere de una base de datos extensa que contenga la posición solar en cada momento del

día, sin embargo, es posible realizar simulaciones con códigos de programación para hallar el ángulo de azimut optimo considerando la posición solar en todo el año.

3.4 Modelado del sistema (simulación en Python)

Posteriormente se realizó un modelado del sistema con código de lenguaje Python. Esta herramienta se trata de un software de programación de alto nivel, pero a la vez sencillo por la escritura de línea por línea, facilitando la interpretación, apto para principiantes y avanzados en programación. La razón del uso de Python es la capacidad de que tiene para manejar ciencia de datos, creando gráficos, diagramas y tablas a partir de los datos obtenidos, además de contar con una alta cantidad de librerías y bibliotecas de terceros, teniendo acceso a base de datos e incluso la posibilidad de importar archivos de lectura para la interpretación de un código.

Pvlib ofrece de modo gratuito las librerías y base de datos para realizar cálculos de sistemas fotovoltaicos, basta con cambiar variables para adecuar el código a los paneles y a la zona de estudio. (pvlib, s.f.)

Para obtener el código correspondiente basta con navegar en el apartado de ejemplos y en el costado derecho se pueden hallar diferentes casos para determinado cálculo. Debido a que los paneles para este proyecto son bifaciales se buscó el código correspondiente.

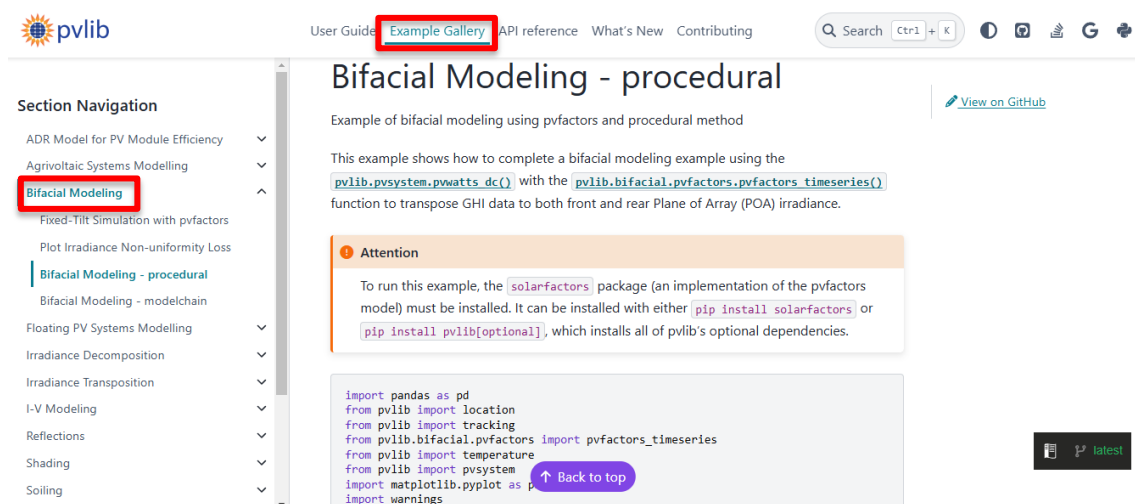


Figura 16. Interfaz de pvlib

Para calcular el ángulo de azimut e inclinación óptimos, se modificó en el código los siguientes datos de entrada:

Ángulo de azimut

Tabla 5. Datos de entrada del código para cálculos de azimut.

Datos de entrada		
1	Latitud	7.3844
2	Longitud	-72.6478
3	Zona horaria	Etc/GMT-5
4	Rango de tiempo de estudio	2023-01-01 a 2023-12-31
5	Intervalo de muestreo	1 hora
6	Nombre de la zona	Pamplona, Colombia
7	Dimensiones del panel	2.25m x 1.13m
8	Irradiancia solar reflejada	0.2
9	Rango de los ángulos de azimut	0° a 330°
10	Intervalos entre ángulos	30°
11	Ángulo de inclinación	8.7°

```

import pandas as pd
from pvlib import location
from pvlib import tracking
from pvlib.bifacial.pvfactories import pvfactories_timeseries
from pvlib import temperature
from pvlib import pvsystem
import matplotlib.pyplot as plt
import warnings

# suppressing shapely warnings that occur on import of pvfactories
warnings.filterwarnings(action='ignore', module='pvfactories')

# using Greensboro, NC for this example
lat, lon = 7.384452657385216, -72.64785425931926
tz = 'Etc/GMT-5'
times = pd.date_range('2024-01-01', '2024-12-31', freq='1h', tz=tz)

# create location object and get clearsky data
site_location = location.Location(lat, lon, tz=tz, name='Pamplona, Colombia')
cs = site_location.get_clearsky(times)

# get solar position data
solar_position = site_location.get_solarposition(times)

```

Diagrama de anotación: Seis recuadros numerados del 1 al 6 están conectados por flechas rojas. El recuadro 1 apunta a la latitud en la línea de código. El recuadro 2 apunta a la longitud. El recuadro 3 apunta a la zona horaria. El recuadro 4 apunta al nombre de la zona en la línea de código. El recuadro 5 apunta al intervalo de muestreo. El recuadro 6 apunta al nombre de la zona en la línea de código.

Figura 17. Código de Pvlb para ángulo de azimut modificado acorde a Pamplona, Norte de Santander, Colombia.


```

# set axis_azimuth, albedo, pvrow width and height, and use
# the pvfactors engine for both front and rear-side absorbed irradiance
axis_azimuth = 0
pvrow_height = 2.25
pvrow_width = 1.13
albedo = 0.2

# Crear arrays con orientaciones fijas cada 30 grados
azimuths = range(0,360,30)
variable = 0

# explicitly simulate on pvarray with 3 rows, with sensor placed in middle row
# users may select different values depending on needs
for azimuth in azimuths:
    surface_tilt = 8.7
    surface_azimuth = azimuth
    irrads = pvfactors_timestep(solar_position['azimuth'],
                                solar_position['apparent_zenith'],
                                surface_azimuth,
                                surface_tilt,
                                axis_azimuth,
                                cs.index,
                                cs['dni'],
                                cs['dhi'],
                                gcr,
                                pvrow_height,
                                pvrow width,
    
```

Figura 18. Código de Pvlb para ángulo de azimut modificado acorde a Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Ángulo de inclinación

Tabla 6. Datos de entrada del código para cálculos de inclinación.

Datos de entrada		
1	Latitud	7.3844
2	Longitud	-72.6478
3	Zona horaria	Etc/GMT-5
4	Rango de tiempo de estudio	2023-01-01 a 2023-12-31
5	Intervalo de muestreo	1 hora
6	Nombre de la zona	Pamplona, Colombia
7	Dimensiones del panel	2.25m x 1.13m
8	Irradiancia solar reflejada	0.2
9	Rango de los ángulos de inclinación	0° a 90°
10	Intervalos entre ángulos	10°
11	Ángulo de azimut	182°

```

import pandas as pd
from pvlib import location
from pvlib import tracking
from pvlib.bifacial.pvfactories import pvfactories_timeseries
from pvlib import temperature
from pvlib import pvsystem
import matplotlib.pyplot as plt
import warnings

# supressing shapely warnings that occur on import of pvfactories
warnings.filterwarnings(action='ignore', module='pvfactories')

# Configuración de ubicación
lat, lon = 7.384452657385216, -72.64785425931926
tz = 'Etc/GMT-5'
times = pd.date_range('2023-01-01', '2023-12-31', freq='H', tz=tz)

site_location = location.Location(lat, lon, tz=tz, name='Pamplona, Colombia')
cs = site_location.get_clearsky(times)

# Obtener datos de posición solar
solar_position = site_location.get_solarposition(times)

# Configurar parámetros para el seguidor solar
gcr = 0.35
max_phi = 60
orientation = tracking.singleaxis(solar_position['apparent_zenith'],
                                solar_position['azimuth'])

```

Figura 19. Código de Pvlib para ángulo de inclinación modificado acorde a Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

```

# Parámetros del sistema
axis_azimuth = 0
pvrow_height = 2.25
pvrow_width = 1.13
albedo = 0.2

# Crear arrays con orientaciones fijas cada 10 grados
Tilts = range(0, 90, 10)

# Inicializamos la figura para graficar todas las curvas
plt.figure(figsize=(10, 6))

# Simular para cada ángulo de inclinación
for tilt in Tilts:
    surface_tilt = tilt
    surface_azimuth = 182
    irrads = pvfactors_timeseries(solar_position['azimuth'],
                                  solar_position['apparent_zenith'],
                                  surface_azimuth,
                                  surface_tilt,
                                  axis_azimuth,
                                  cs.index,
                                  cs['dni'],
                                  cs['dhi'],
                                  gcr,
                                  pvrow_height,
                                  pvrow_width
    )
    
```

Figura 20. Código de Pvlb modificado para ángulo de inclinación acorde a los paneles y parámetros de estudio.

Finalmente se comparó los datos obtenidos de la simulación con datos reales recopilados de los paneles solares simulando los ángulos óptimos con un multímetro.



Figura 21. Foto representativa de la toma de mediciones.

3.5 Diseño del prototipo del sistema de entrenamiento solar 3D

Pese a que los paneles no fueron montados en una estructura, se realizó un modelo en 3D con el software gratuito en línea Thinkercad para plasmar la idea de la instalación de los paneles como practica para los alumnos de la Universidad de Pamplona. Dicha ilustración fue elaborada por el autor del informe y fue realizada por solo tiene fines ilustrativos para la comprensión espacial del diseño propuesto con los paneles.

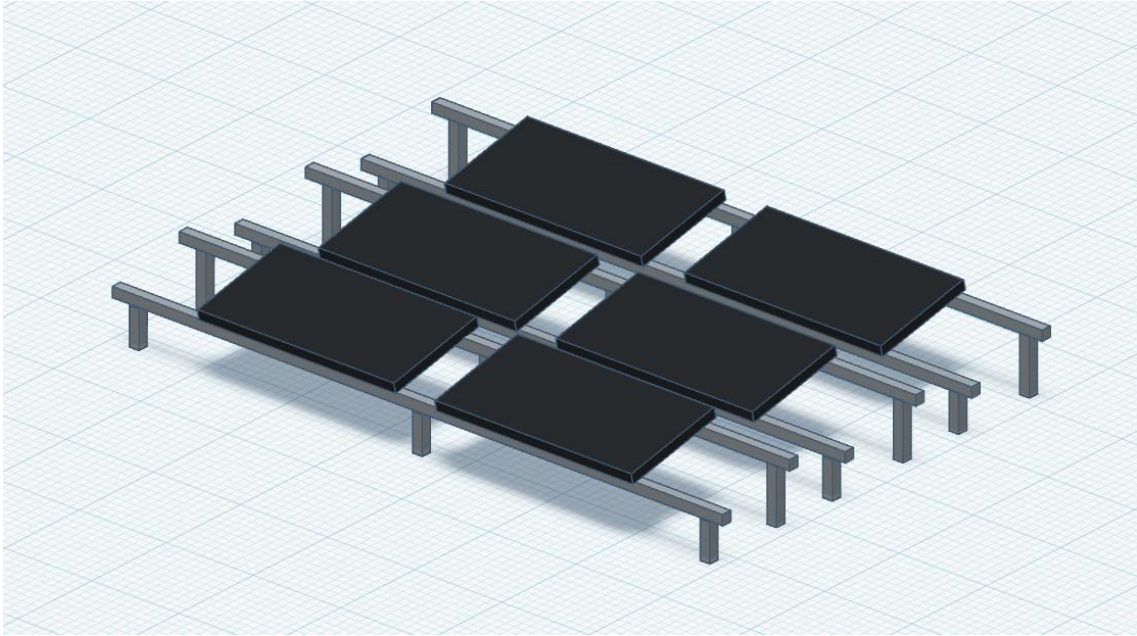


Figura 22. Modelo 3D del sistema de entrenamiento solar. Vista ortogonal frontal

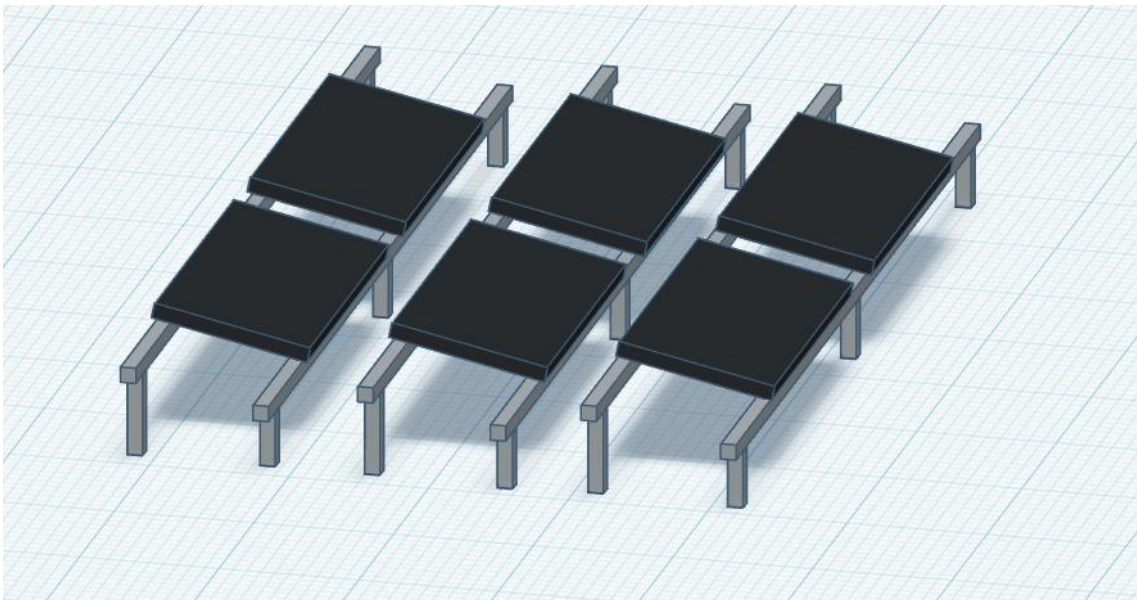


Figura 23. Modelo 3D del sistema de entrenamiento solar. Vista ortogonal lateral

4. Resultados

Mediante librería establecida en Pvlb basada en lenguaje de programación Python se realizaron varios modelados. La simulación tuvo como propósito observar la producción en diferentes ángulos de inclinación y de azimut. Esto debido a la zona cercana al ecuador.

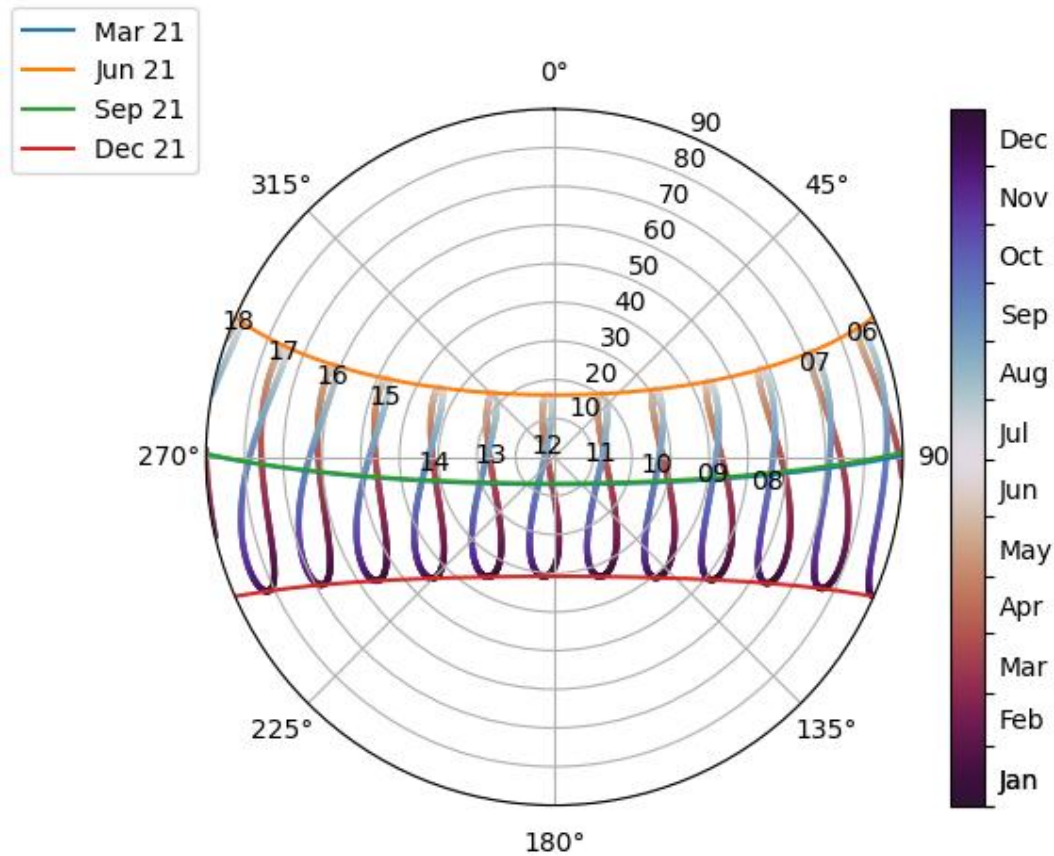


Figura 24. Trayectoria solar de Pamplona, Norte de Santander, Colombia en 2023.

En la *Tabla 7* se puede observar los diferentes elementos que componen la *Figura 24*. Los cuales muestran la posición solar en Pamplona a lo largo del año 2023. Las 4 líneas representan la trayectoria solar polar del día en el que entra cada estación del año. Es notable que la trayectoria del sol recorre mayor tiempo en el lado sur de Pamplona. En verano la trayectoria del sol atraviesa el norte, mientras que, en invierno, primavera y otoño por el lado sur del hemisferio, teniendo estas dos últimas la misma trayectoria. También es apreciable el eje angular de la gráfica que al tratarse de un círculo recorre de 0 a 360°, donde 0° es el norte y 180° el sur. Así mismo la declinación solar donde 0° es el zenith y 90° el horizonte. Mientras que las horas solares vienen acompañadas de un espectro de colores que van desde el cálido oscuro hasta el frío oscuro.

Tabla 7. Elementos rango y representaciones de la figura #

Elementos	Rango	Representa
Eje angular	0° a 360°	Representa la posición del sitio donde 0° es el norte y 180° el sur.
Declinación solar	0° a 90°	Representa la inclinación solar en un eje vertical donde 90° es el horizonte.
Horas solares	06:00 a 18:00	Representa las horas solares apreciables en la región.
Espectro mensual	Enero a diciembre.	El espectro de colores representa los meses del año.
Trayectoria solar	Primavera, verano, otoño e invierno.	Trayectoria solar en la entrada de las estaciones del año.

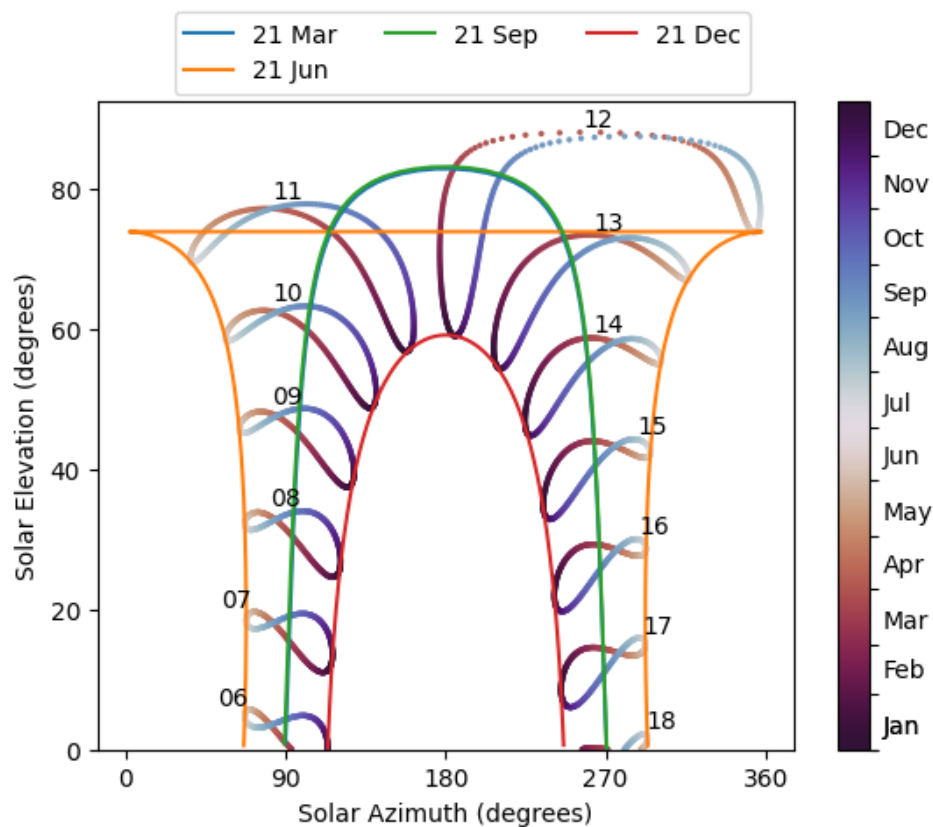


Figura 25. Trayectoria solar de Pamplona, Norte de Santander, Colombia en 2023.

La Figura 25 representa la trayectoria solar anual con un enfoque en la declinación solar con respecto al eje de azimut de Pamplona.

En invierno, primavera y otoño aparentemente tiene más incidencia solar en el sur, sin embargo, debido a la variación solar se tiene que realizar el cálculo correspondiente para determinar si el ángulo de azimut óptimo realmente esta hacia el sur.

Para determinar el ángulo de azimut óptimo se ejecutó el código para hallarlo.

4.1 Resultados del ángulo de azimut

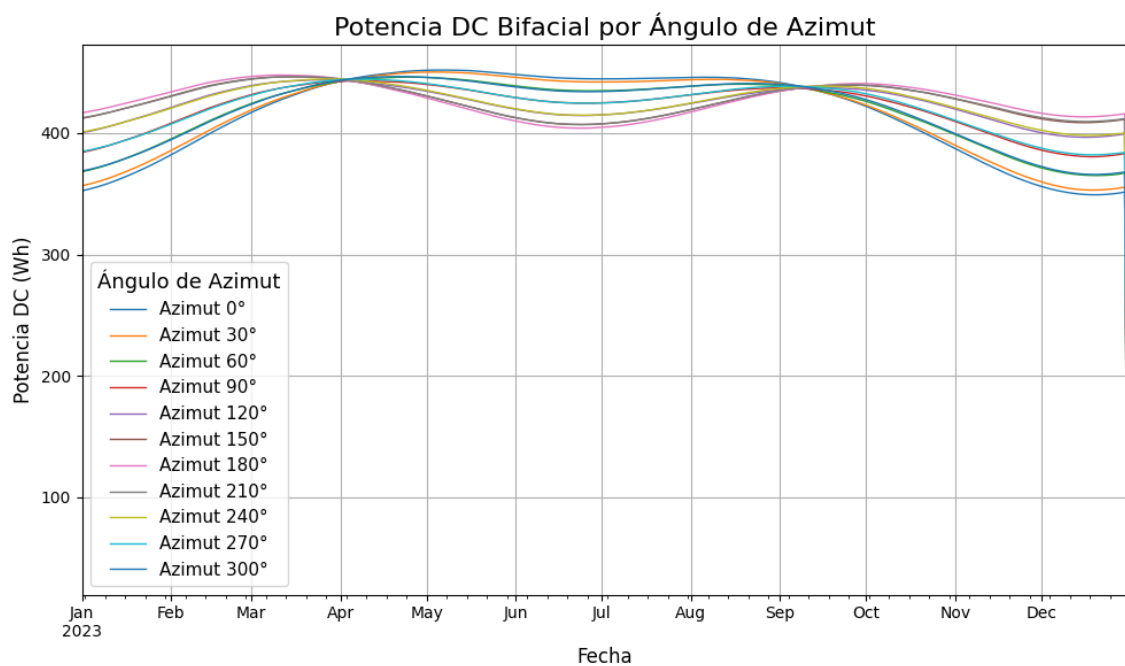


Figura 26. Modelado de generación según el ángulo de azimut 0° a 330°

Los valores generados en DC a lo largo del año de 0° a 330° son:

Tabla 8. Potencia generada de 0° a 330° en el año 2023.

Ángulos	Energía anual [kWh]
0	1515.3228
30	1517.5961
60	1524.7091
90	1534.1506
120	1543.9182

150	1551.9563
180	1554.9982
210	1552.8817
240	1546.3295
270	1536.4409
300	1525.8291
330	1518.093

De acuerdo al modelado de la *Figura 26* la mayor generación de DC se lleva a cabo en el ángulo 180° de azimut, sin embargo, los valores del ángulo de 210° indican mayor generación que los del ángulo 150° , esto podría indicar que el ángulo óptimo no sea 180° , sino que se halle entre 150° y 210° . Por ello fue necesaria una segunda simulación en el ángulo de azimut entre 150° y 200° para reducir el intervalo en el cual se encuentra el ángulo óptimo, como se muestra en la *Figura 27*.

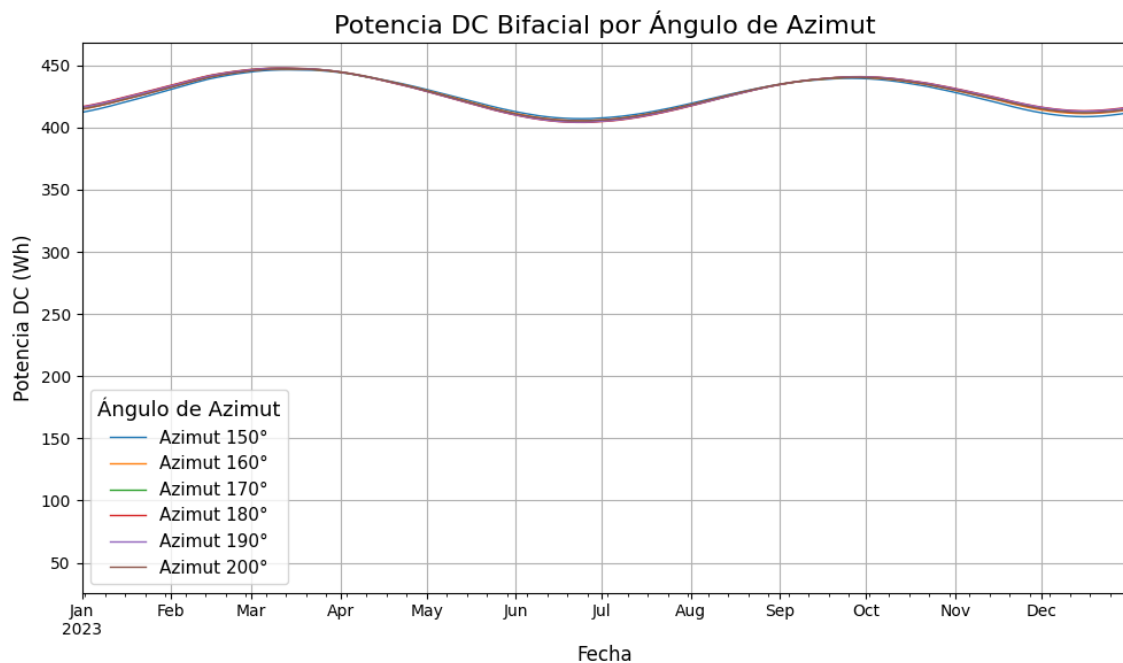


Figura 27. Modelado de generación según el ángulo de azimut 150° a 200°

Los valores obtenidos de la evaluación de la *Figura 27* son:

Tabla 9. Modelado de generación según el ángulo de azimut 150° a 200°

Ángulos	Energía anual [kWh]
150	1551.9563
160	1553.6226
170	1554.6508
180	1554.9982
190	1554.7774
200	1554.0455

La evaluación entre los ángulos de 150° y 200° de azimut muestra que el ángulo óptimo se encuentra entre los ángulos 170° y 190° por lo que se debe realizar un nuevo modelado entre estos ángulos.

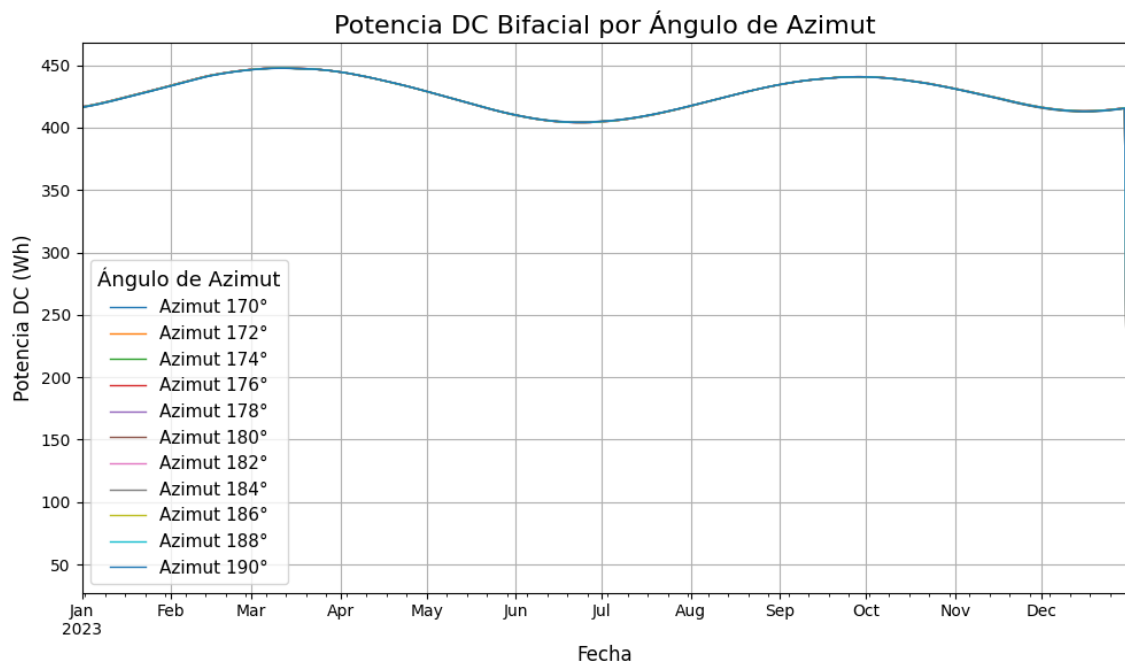


Figura 28. Modelado de generación según el ángulo de azimut 170° a 190°

Los valores generados del ángulo de azimut entre 170° a 190° mostrados en la *Figura 28* son:

Tabla 10. Potencia generada DC entre los ángulos de azimut 170° y 190°.

Ángulos	Energía anual [kWh]
170	1554.6508
172	1554.7756
174	1554.8730

176	1554.9426
178	1554.9844
180	1554.9982
182	1555.0149
184	1554.9830
186	1554.9339
188	1554.8657
190	1554.7774

La evaluación indicó que el ángulo óptimo de mayor aprovechamiento solar está en el ángulo 182° de azimut (tabla 10).

Posteriormente se determinó el ángulo de inclinación que debe tener el módulo de entrenamiento, para ello se llevó a cabo el mismo procedimiento en la misma librería que en el ángulo de azimut (Pvlib).

4.2 Resultados del ángulo de inclinación

En la *Figura 29* se evaluó la inclinación del panel entre 0° y 90° .

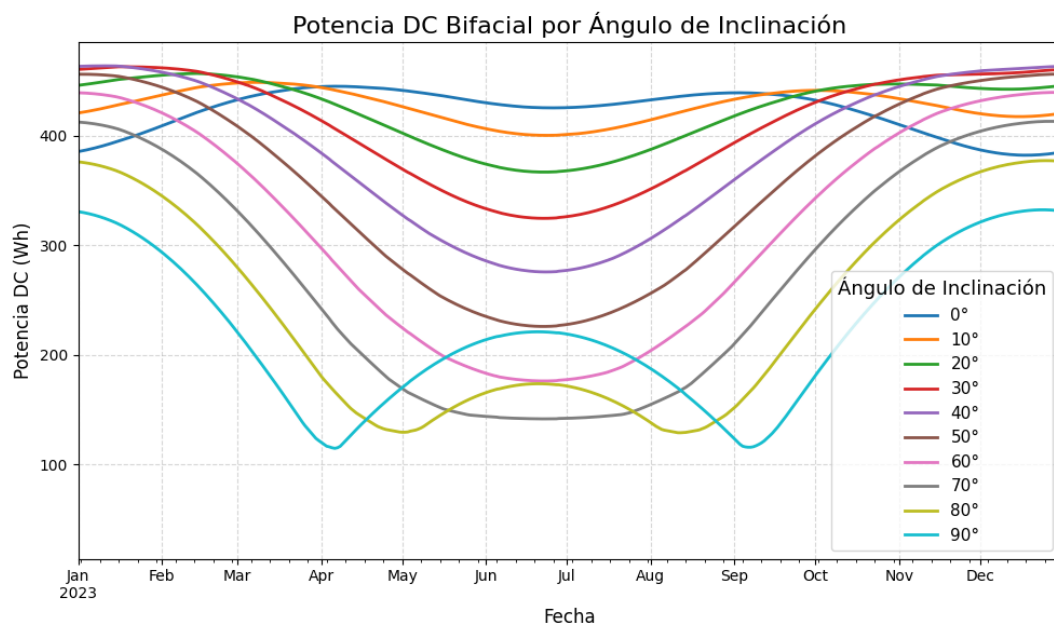


Figura 29. Evaluación del ángulo de inclinación entre 0° y 90° .

En la tabla 11 se muestran los resultados de la gráfica 9, cuyos valores de generación en DC son:

Tabla 11. Evaluación del ángulo de inclinación entre 0° y 90°.

Ángulos	Energía anual [kWh]
0	1538.6
10	1555.11
20	1537.11
30	1484.86
40	1396.77
50	1280.63
60	1139.26
70	986.37
80	869.07
90	804.96

El modelo indicó que el mayor aprovechamiento solar esta entre los ángulos de inclinación 10° y 20°. Por ello nuevamente se debe realizar una segunda evaluación entre estos ángulos para lograr averiguar cuál es el ángulo óptimo de conversión. (Figura 30)

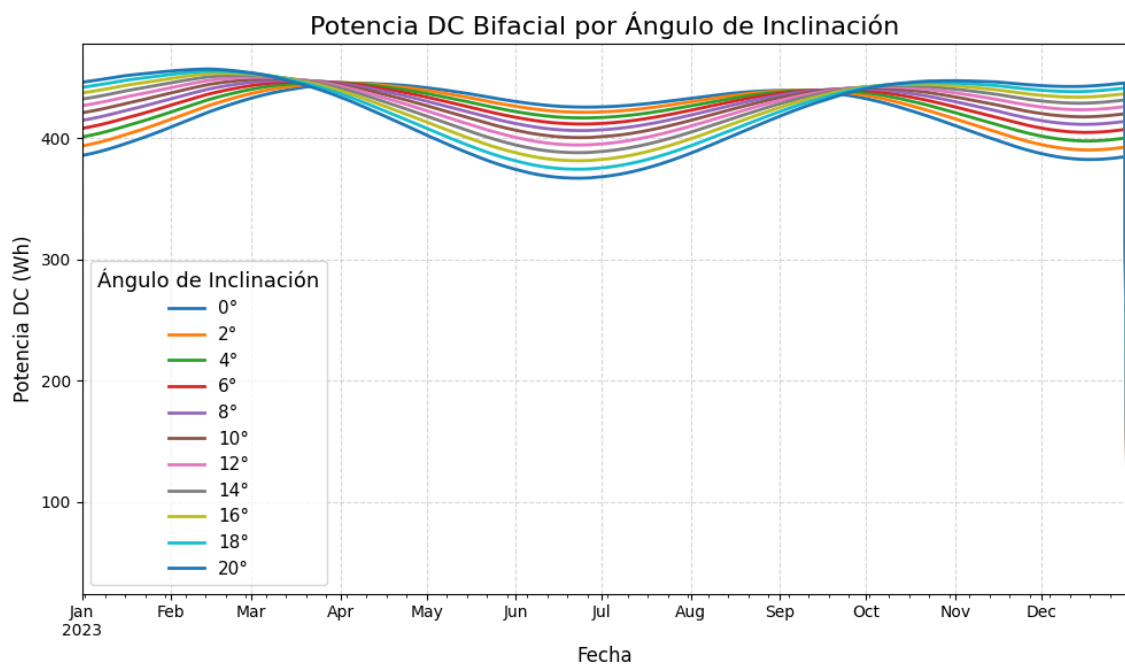


Figura 30. Evaluación del ángulo de inclinación entre 0° y 20°.

Los valores de esta evaluación obtenidos de la *Figura 30* son:

Tabla 12. Evaluación del ángulo de inclinación entre 0° y 20°.

Ángulo	Energía anual [kWh]
0	1538.60
2	1544.77
4	1549.48
6	1552.79
8	1554.68
10	1555.11
12	1554.16
14	1551.88
16	1548.29
18	1543.37
20	1537.11

En la tabla 12 se determina que el ángulo óptimo se encuentra entre los ángulos 10° y 14°. Para obtener el ángulo exacto en el cual el módulo de entrenamiento generaría más potencia se evaluó nuevamente entre los ángulos de inclinación 6° y 13° como se muestra en la *Figura 31*.

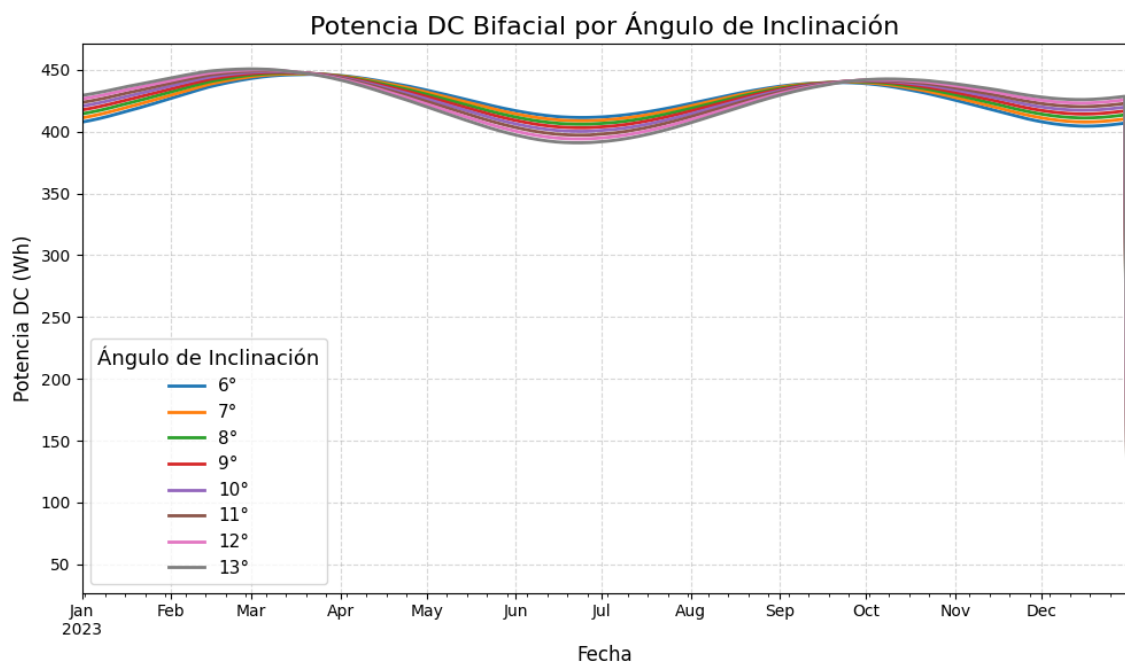


Figura 31. Evaluación del ángulo de inclinación entre 6° y 13°.

Los resultados obtenidos de la *Figura 31* son:

Tabla 13. Evaluación del ángulo de inclinación entre 6° y 13°.

Ángulos	Energía anual [kWh]
6	1552.79
7	1553.91
8	1554.68
9	1555.08
10	1555.11
11	1554.80
12	1554.16
13	1553.19

La evaluación muestra el ángulo de inclinación óptimo para obtener la mayor generación de energía. El sistema propuesto deber orientarse a 10° de inclinación y 182° de azimut. Estos son los ángulos óptimos que deberían tener no solo el módulo de enteramiento, sino cualquier sistema de captación de energía solar en la zona si es que se busca maximizar la captación solar en todo el año.

4.3 Simulación anual con los ángulos de azimut e inclinación

Una vez que se obtuvieron los ángulos de azimut e inclinación óptimos para una mayor conversión de energía se simulo la proyección de energía que se obtendrá a lo largo del año.

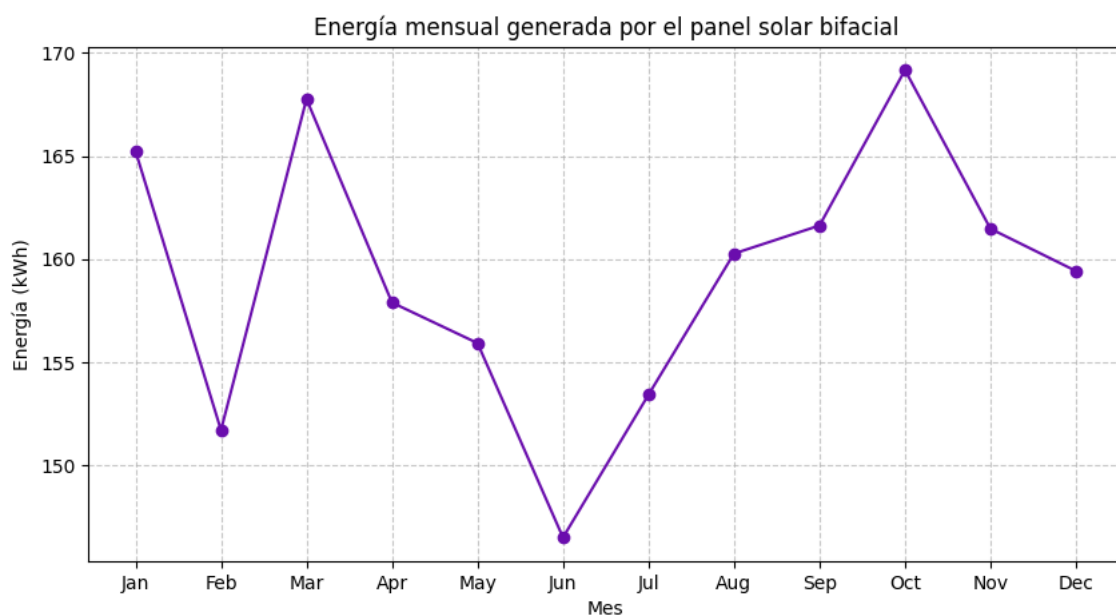


Figura 32. Energía generada en el año 2023 con los ángulos óptimos.

De acuerdo a la *Figura 32* se tiene mayor energía en primavera y otoño que en invierno, sin embargo, en verano hay una disminución considerable de la energía debido a que la trayectoria solar cambia al hemisferio norte como se muestra en la *Figura 24*. Pese a esto, esta configuración de los ángulos de azimut e inclinación es la que más genera a lo largo del año obteniendo 1555.11 kWh al año por un solo panel solar LONGI LR5-72HBD-540M.

4.4 Simulación anual con 0° de inclinación

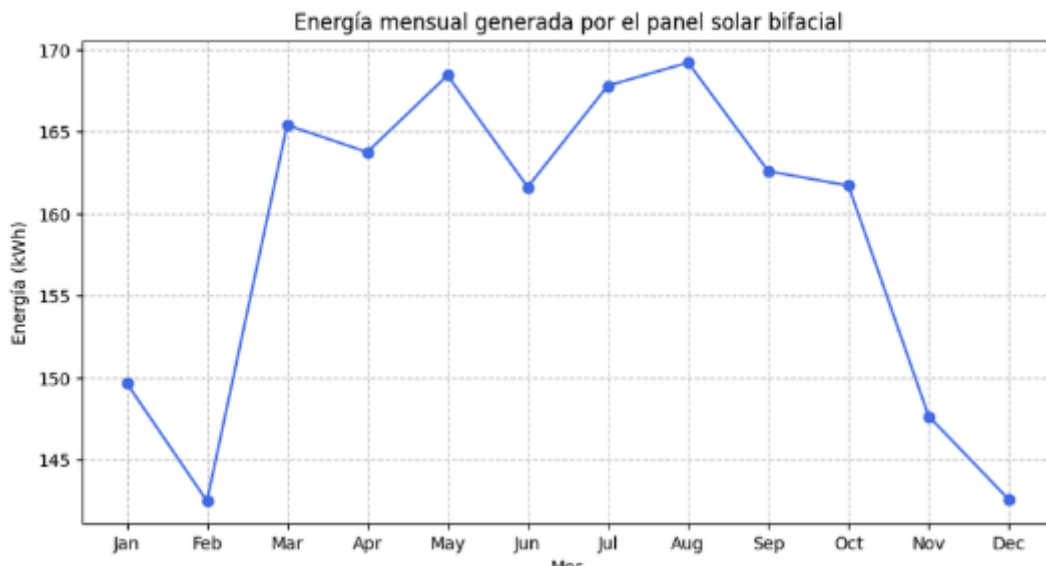


Figura 33. Energía generada en el año 2023 con 0° de inclinación

De acuerdo con la *Figura 33*, utilizando 0° de inclinación en los paneles solares, podemos observar mayor energía durante el verano, sin embargo, durante invierno la energía decae drásticamente.

4.5 Mediciones reales del módulo fotovoltaico

Los paneles solares LONGI LR5-72HBD-540M se ubicaron en el techo del edificio Simón Bolívar. Esto para tomar mediciones solares reales y compararlas con los datos obtenidos en el modelado de Python.



Figura 34. Paneles solares sobre el edificio Simón Bolívar.

Se tomaron mediciones el día 25 de julio del 2024 de 10:00 AM a 12:00 PM en intervalos de 30 minutos. A continuación, se muestran las mediciones reales recopiladas.

Para medir la energía solar de los paneles se usó el multímetro UT89X de la marca UNI-T



Figura 35. Multímetro UNI-T UT89X (UNI-T, s.f.)

El 25 de julio del 2024 se recopilaron los siguientes valores que se muestran en la tabla 14, donde además de visualizar los valores obtenidos directamente del multímetro, se simuló la potencia de los paneles en el mismo día en los mismos intervalos de tiempo con la librería de Pvlb.

Tabla 14. Valores recopilados del día 25 de julio del 2024.

Hora	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia real [W]	Potencia simulada [W]
10:00 AM	44.84	5.2	233.168	256.6460
10:30 AM	45.9	5.55	254.745	268.8593
11:00 AM	46.28	5.9	273.052	277.6327
11:30 AM	45.11	6.25	281.937	282.8159
12:00 PM	45.3	6.6	298.98	284.3197

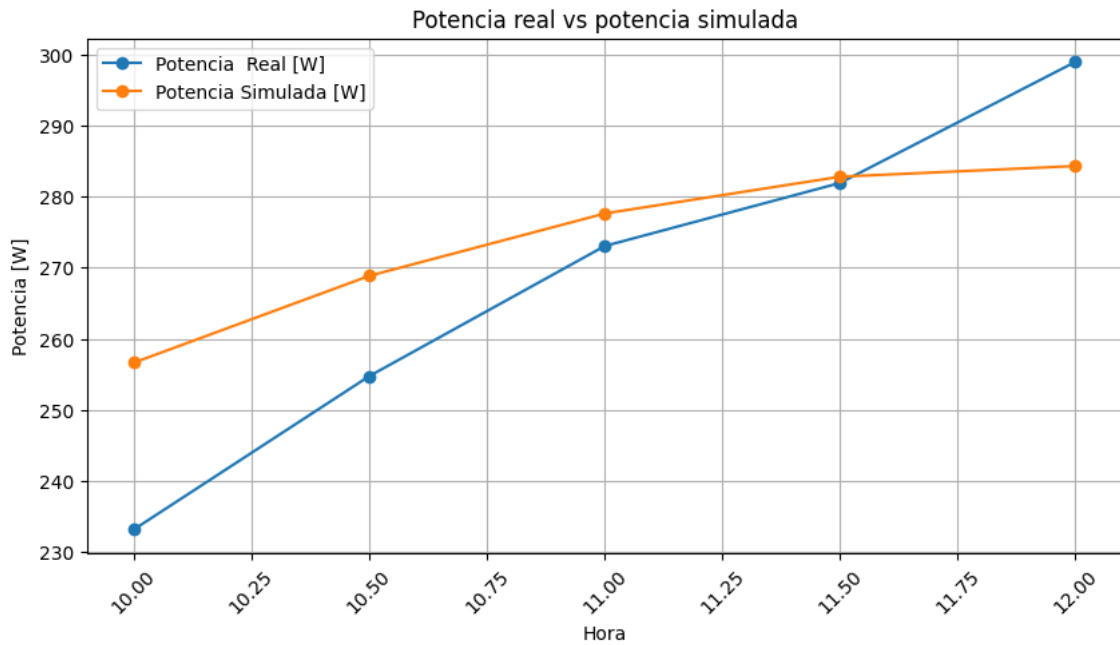


Figura 36. Potencia real vs potencia simulada

En la *Figura 36* se observa una tendencia similar entre la potencia real de uno de los paneles y la potencia simulada del panel en python, esto representa no solo el buen estado de los paneles, sino tambien el aprovechamiento solar que se obtendría de los modulos solares.

5. Conclusiones, propuestas y recomendaciones

En Pamplona, Norte de Santander se analizaron los datos solares para determinar la trayectoria solar polar anual en dicha locación usando un código en lenguaje Python y librerías de Pvlib. Esto para determinar las posibles sombras en el techo del edificio Simón Bolívar en la Universidad de Pamplona, en donde el área asignada para el proyecto resultó ser el ideal para el sistema de entrenamiento solar.

Asimismo, usando los códigos de Pvlib y su librería se determinaron los ángulos de azimut e inclinación donde se genera una mayor conversión de la energía solar incidente en la zona a lo largo del año. El ángulo de azimut se evaluó de 0° a 360° , es decir, se evaluó la generación de energía en cada ángulo de azimut en todo el año 2023, obteniendo una ligera, aunque mayor producción a los 182° (sur). Por otro lado, el ángulo de inclinación se evaluó de 0° a 90° obtenido que el mejor ángulo se encuentra 10° respecto al suelo, y se obtuvo que en el año de 2023 la energía anual captada fue de 1555.11 kWh simulados por un solo panel. También se contempló ubicar los paneles a 0° grados de inclinación para que pudiesen tener

cobertura solar en todo el año, sin embargo, Pamplona es se encuentra en una locación fría donde la temperatura promedio en invierno esta entre los 10°C y 14°C, por lo que es más viable tener mayor energía durante esta época del año, por ello se descarta la posibilidad de ubicar los paneles a 0° de inclinación.

Con dichos ángulos que deben tener los paneles, se evaluó la generación de energía de uno de los paneles y se comparó con la simulación del día 25 de julio del 2024, encontrando una tendencia similar y dejando claro la certeza de la correcta funcionalidad del código de Python. Pamplona resultó ser una localidad ideal para instalaciones fotovoltaicas por la calidad de los parámetros solares incidentes en la zona, no solo como como bancos de entrenamiento solar para aprendizaje, sino también para instalaciones solares interconectadas a red y aisladas pese a las variaciones solares de la locación.

6. Referencias

- Arrieta Paternina, M., Olmos Villalba, L. C., Izquierdo Nuñez, J. L., & Álvarez López, R. A. (2012). Diseño de prototipo de sistema solar fotovoltaico optimizando el ángulo de inclinación de los paneles solares. *PROSPECTIVA*, 97-107.
- Ballenilla, F. (2005). La sostenibilidad desde la perspectiva del agotamiento de los combustibles fósiles, un problema socio-ambiental relevante. *Investigación en la Escuela*, 73-87.
- Cárdenas Dulcey, B. S. (2016). DISEÑO DE ALUMBRADO PÚBLICO CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA. *DISEÑO DE ALUMBRADO PÚBLICO CON GENERACIÓN FOTOVOLTAICA*. Pamplona, Norte de Santander, Colombia: UNIVERSIDAD DE PAMPLONA. FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES.
- Cevallos Ulloa, H. I., Lindao Fiallos, C. R., & Layana Castro, P. E. (s.f.). IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA SCADA EN LABVIEW PARA EL CONTROL AUTOMATIZADO DEL MÓDULO SOLAR EPH2 DEL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN. *Repositorio de la Escuela Superior Politécnica del Litoral*. Obtenido de <https://www.dsplace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/29937/IMPLEMENTACI%c3%93N%20DE%20UN%20SISTEMA%20SCADA%20EN%20LABVIEW%20PARA%20EL%20CONTROL%20AUTOMATIZADO%20DEL%20>

M%c3%93DULO%20SOLAR%20EPH2%20DEL%20LABORATORIO%20DE%
20INSTRUMENTACI%c3%93N.p

- Contreras, W., Galban, M. G., & Sepúlveda, S. B. (2018). Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta. *SCIELO*.
- Duarte, D., Núñez, A., Salmantón, L., & Pazos, A. (Agosto de 2022). *Radiación de cuerpo negro*. Obtenido de Centro Regional de Profesores del Sur.:
<https://repositorio.cfe.edu.uy/bitstream/handle/123456789/2027/Duarte%2C%20D.%2C%20Radiaci%C3%B3n.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Duncan, R. C. (2007). *La teoría de Olduvai: El declive final es inminente*. Obtenido de
<https://www.crisisenergetica.org/ficheros/TeoriaOlduvaiFeb2007.pdf>
- EcuRed. (2013). Obtenido de Ley de Wien: https://www.ecured.cu/Ley_de_Wien
- Energía, S. d. (2022). *Balance Nacional de Energía*.
- Fontal, B. (2005). *El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones*. Mérida, Venezuela: Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química .
- Grave-Capistrán, M. A., García León, R. A., & Quintero-Quintero, W. (2019). ENERGÍA CINÉTICA PRODUCIDA EN FOTOELECTRONES DE CU INDUCIDO POR FOTONES DE ALTA ENERGÍA DE LA LUZ. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 73-78.
- Higuera Valenzuela, H. J. (s.f.). *Red de Energía Solar* . Obtenido de ¿COMO FUNCIONAN LAS ENERGÍAS SOLARES' ¿Y COMO MEJORAR SU FUNCIONAMIENTO?: <https://redsolar.ier.unam.mx/wp-content/uploads/2018/12/Como-funcionan-las-celdas-solares.pdf>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (s.f.). *pveducation*. Obtenido de Angulo de inclinación: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/angulo-de-declinaci%C3%B3n>
- Japuntes. (28 de Noviembre de 2022). *Youtube*. Obtenido de
<https://www.youtube.com/watch?v=1kVKG4NOyxc>
- Leñero Bardallo, J. A. (s.f.). *Fundamentos de la electrónica y los semiconductores*. Cadiz, España: Editorial UCA.
- Martínez Romero, S. C. (Septiembre de 2016). DISEÑO DE UNA CUBIERTA FOTOVOLTAICA. *DISEÑO DE UNA CUBIERTA FOTOVOLTAICA*. Valencia, Falcón, Venezuela: ETS de Ingeniería de la Edificación, Universidad Politécnica De Valencia.
- Matiz Mora, D. F., & Macareno Carrillo, J. W. (2019). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN DIDÁCTICA PARA EL . *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN*

- DE UNA ESTACIÓN DIDÁCTICA PARA EL . San José de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia: UNIVERSIDAD DE SANTANDER – CAMPUS CÚCUTA .
- Mayo, P. (12 de Julio de 2019). *espíritu RACER*. Obtenido de El coche solar no existe: <https://espirituracer.com/reportajes/el-coche-solar-no-existe/>
- Mesa, J. D., Escobar Mejia, A., & Hincapie Isaza, R. A. (2009). Descripción y análisis del efecto fotovoltaico en la región. *SCIENTIA ET TECHNICA*, 327-332.
- Mora Trujillo, G. A. (2015). Características energéticas de una placa fotovoltaica, por. *YACHANA*, 169-175.
- Muñoz, A. (19 de Febrero de 2023). *edp energía*. Obtenido de Conexión de paneles solares: en serie, en paralelo y mixto: <https://www.edpenergia.es/es/blog/energia-fotovoltaica/conexion-paneles-solares/>
- NASA Power Dav. (s.f.). Obtenido de NASA data acces view: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Pareja Aparicio, M. (2010). *Radiación solar y su aprovechamiento energético*. Barcelona, España: marcombo ediciones técnicas.
- Perez Navarro, A. (2020). *Ondas electromagnéticas* . Catalunya: Universidad Oberta de Catalunya.
- Perpiñán Lamigueiro, O. (2013). *ENERGÍA SOLAR Fotovoltaica*. creative commons.
- PVGIS. (2015). *PVGIS*. Obtenido de <https://pvgis.com/>
- pvlib. (s.f.). *pvlib*. Obtenido de <https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/#>
- Rodriguez Meza, M. A., & Cervantes-Cota, J. L. (2006). El efecto fotoeléctrico. *Ciencia ergo sum*, 303-311.
- Rodríguez, P. C. (2001). *Semiconductores*. Buenos Aires, Argentina: LIBRERIA Y EDITORIAL ALSINA.
- Solis. (28 de Noviembre de 2022). *Solis*. Obtenido de Influencia del acimut y la inclinación en el rendimiento del sistema fotovoltaico: https://www.solisinverters.com/mx/documentation/Influence_of_Azimuth_and_Tilt_on_Yield_of_PV_System_11281216.html
- Térmica, R. (s.f.). *Ley de Planck y ley del desplazamiento de Wien*. Obtenido de <https://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/vrl/tutorials/euromet/courses/spanish/satmet/s2300/s2300005.htm>
- Tomé López, C. (12 de Mayo de 2020). *CUADERNO DE CULTURA CIENTIFICA*. Obtenido de Impurezas dopantes: <https://culturacientifica.com/2020/05/12/impurezas-dopantes/>
- Unidas, N. (2023). Una Población en Crecimiento. *Naciones Unidas*.

UNI-T. (s.f.). *UNI-T*. Obtenido de <https://meters.uni-trend.com/product/ut89x-series/>

Vega de Kuyper, J. C., & Ramírez Morales, S. (2014). *FUENTES DE ENERGÍA, RENOVABLES Y NO RENOVABLES*. Ciudad de México: Alfaomega.

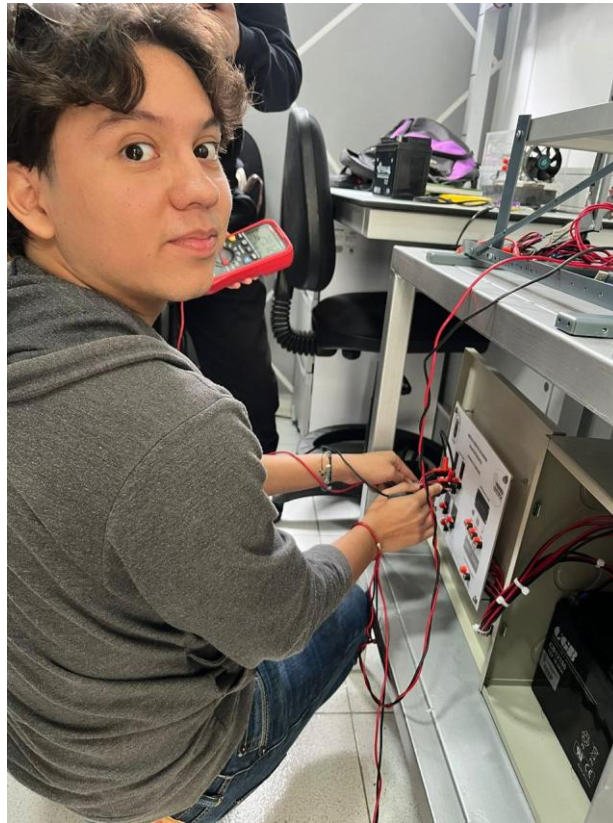
Zamora Ramos, R. (s.f.). *Estudio de la radiación del cuerpo negro*. Obtenido de Determinación de la constante de Wien.:

http://users.df.uba.ar/dmitnik/fisica4/cuerponegro/radiacion_cuerpo_negro.pdf

7. Anexos



Fuente: Archivo



Fuente: Archivo

7.1 Código de la figura 24

```
from pvlib import solarposition
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

tz = 'Etc/GMT+5'
lat, lon = 7.384452657385216, -72.64785425931926

times = pd.date_range('2023-01-01 00:00:00', '2023-12-31',
freq='H', tz=tz)
solpos = solarposition.get_solarposition(times, lat, lon)
# remove nighttime
solpos = solpos.loc[solpos['apparent_elevation'] > 0, :]

ax = plt.subplot(1, 1, 1, projection='polar')
# draw the analemma loops
points = ax.scatter(np.radians(solpos.azimuth),
solpos.apparent_zenith,
                    s=2, label=None, c=solpos.index.dayofyear,
                    cmap='twilight_shifted_r')
# add and format colorbar
```

```

cbar = ax.figure.colorbar(points)
times_ticks = pd.date_range('2023-01-01', '2024-01-01', freq='MS',
tz=tz)
cbar.set_ticks(ticks=times_ticks.dayofyear, labels=[], minor=False)
cbar.set_ticks(ticks=times_ticks.dayofyear+15,
                labels=times_ticks.strftime('%b'),
                minor=True)
cbar.ax.tick_params(which='minor', width=0)

# draw hour labels
for hour in np.unique(solpos.index.hour):
    # choose label position by the smallest radius for each hour
    subset = solpos.loc[solpos.index.hour == hour, :]
    r = subset.apparent_zenith
    pos = solpos.loc[r.idxmin(), :]
    ax.text(np.radians(pos['azimuth']), pos['apparent_zenith'],
            str(hour).zfill(2), ha='center', va='bottom')

# draw individual days
for date in pd.to_datetime(['2023-03-21', '2023-06-21', '2023-09-
21', '2023-12-21']):
    times = pd.date_range(date, date+pd.Timedelta('24h'),
freq='5min', tz=tz)
    solpos = solarposition.get_solarposition(times, lat, lon)
    solpos = solpos.loc[solpos['apparent_elevation'] > 0, :]
    label = date.strftime('%b %d')
    ax.plot(np.radians(solpos.azimuth), solpos.apparent_zenith,
label=label)

ax.figure.legend(loc='upper left')

# change coordinates to be like a compass
ax.set_theta_zero_location('N')
ax.set_theta_direction(-1)
ax.set_rmax(90)

plt.show()

```

7.2 Código de la Figura 25

```

from pvlib import solarposition
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

tz = 'Etc/GMT+5'

```



```

lat, lon = 7.384452657385216, -72.64785425931926
times = pd.date_range('2023-01-01 00:00:00', '2024-01-01',
freq='H', tz=tz)

solpos = solarposition.get_solarposition(times, lat, lon)
# remove nighttime
solpos = solpos.loc[solpos['apparent_elevation'] > 0, :]

fig, ax = plt.subplots()
points = ax.scatter(solpos.azimuth, solpos.apparent_elevation, s=2,
                    c=solpos.index.dayofyear, label=None,
                    cmap='twilight_shifted_r')
# add and format colorbar
cbar = fig.colorbar(points)
times_ticks = pd.date_range('2023-01-01', '2024-01-01', freq='MS',
tz=tz)
cbar.set_ticks(ticks=times_ticks.dayofyear, labels=[], minor=False)
cbar.set_ticks(ticks=times_ticks.dayofyear+15,
                labels=times_ticks.strftime('%b'),
                minor=True)
cbar.ax.tick_params(which='minor', width=0)

for hour in np.unique(solpos.index.hour):
    # choose label position by the largest elevation for each hour
    subset = solpos.loc[solpos.index.hour == hour, :]
    height = subset.apparent_elevation
    pos = solpos.loc[height.idxmax(), :]
    azimuth_offset = -10 if pos['azimuth'] < 180 else 10
    ax.text(pos['azimuth']+azimuth_offset,
pos['apparent_elevation'],
            str(hour).zfill(2), ha='center', va='bottom')

for date in pd.to_datetime(['2023-03-21', '2023-06-21', '2023-09-
21', '2023-12-21']):
    times = pd.date_range(date, date+pd.Timedelta('24h'),
freq='5min', tz=tz)
    solpos = solarposition.get_solarposition(times, lat, lon)
    solpos = solpos.loc[solpos['apparent_elevation'] > 0, :]
    label = date.strftime('%d %b')
    ax.plot(solpos.azimuth, solpos.apparent_elevation, label=label)

ax.figure.legend(loc='upper center', bbox_to_anchor=[0.45, 1],
ncols=3)
ax.set_xlabel('Solar Azimuth (degrees)')
ax.set_ylabel('Solar Elevation (degrees)')
ax.set_xticks([0, 90, 180, 270, 360])
ax.set_ylim(0, None)
    
```

```
plt.show()
```

7.3 Código del ángulo de azimut

```
import pandas as pd
from pvlib import location
from pvlib import tracking
from pvlib.bifacial.pvectors import pvfactors_timeseries
from pvlib import temperature
from pvlib import pvsystem
import matplotlib.pyplot as plt
import warnings

# suppressing shapely warnings that occur on import of pvfactors
warnings.filterwarnings(action='ignore', module='pvfactors')

# using Greensboro, NC for this example
lat, lon = 7.384452657385216, -72.64785425931926
tz = 'Etc/GMT-5'
times = pd.date_range('2023-01-01', '2023-12-31', freq='H', tz=tz)

# create location object and get clearsky data
site_location = location.Location(lat, lon, tz=tz, name='Pamplona, Colombia')
cs = site_location.get_clearsky(times)

# get solar position data
solar_position = site_location.get_solarposition(times)

# set ground coverage ratio and max_angle to
# pull orientation data for a single-axis tracker
gcr = 0.35
max_phi = 60
orientation =
tracking.singleaxis(solar_position['apparent_zenith'],
                    solar_position['azimuth'],
                    max_angle=max_phi,
                    backtrack=True,
                    gcr=gcr
                    )

# set axis_azimuth, albedo, pvrow width and height, and use
# the pvfactors engine for both front and rear-side absorbed
irradiance
axis_azimuth = 0
pvrow_height = 2.25
```

```

pvrow_width = 1.13
albedo = 0.2

# Crear arrays con orientaciones fijas cada 45 grados
azimuths = range(0,360,30)
variable = 0

# explicitly simulate on pvarray with 3 rows, with sensor placed in
middle row
# users may select different values depending on needs
for azimuth in azimuths:
    surface_tilt = 30
    surface_azimuth = azimuth
    irrads = pvfactors_timeseries(solar_position['azimuth'],
                                solar_position['apparent_zenith'],
                                surface_azimuth,
                                surface_tilt,
                                axis_azimuth,
                                cs.index,
                                cs['dni'],
                                cs['dhi'],
                                gcr,
                                pvrow_height,
                                pvrow_width,
                                albedo,
                                n_pvrows=3,
                                index_observed_pvrow=1
                                )

    # turn into pandas DataFrame
    irrads = pd.concat(irrads, axis=1)

    # using bifaciality factor and pvfactors results, create
effective irradiance
    bifaciality = 0.75
    effective_irrad_bifi = irrads['total_abs_front'] +
(irrads['total_abs_back']
                                *
bifaciality)

    # get cell temperature using the Faïman model
    temp_cell = temperature.faïman(effective_irrad_bifi,
temp_air=25,
                                wind_speed=1)

    # using the pvwatts_dc model and parameters detailed above,
    # set pdc0 and return DC power for both bifacial and monofacial

```

```

pdc0 = 540
gamma_pdc = -0.0043
pdc_bifi = pvsystem.pvwatts_dc(effective_irrad_bifi,
                                temp_cell,
                                pdc0,
                                gamma_pdc=gamma_pdc
                                ).fillna(0)

pdc_bifi.plot(title='Bifacial Simulation anual', ylabel='DC
Power', label=f'{azimuth}'
)

hola=pdc_bifi.sum()
print(f'Total DC Power for azimuth {azimuth}: {hola}')

# Mostrar los gráficos
plt.legend()
plt.show()

```

7.4 Código del ángulo de inclinación

```

import pandas as pd
from pvlib import location
from pvlib import tracking
from pvlib.bifacial.pvfactories import pvfactories_timeseries
from pvlib import temperature
from pvlib import pvsystem
import matplotlib.pyplot as plt
import warnings

# supressing shapely warnings that occur on import of pvfactories
warnings.filterwarnings(action='ignore', module='pvfactories')

# using Greensboro, NC for this example
lat, lon = 7.384452657385216, -72.64785425931926
tz = 'Etc/GMT-5'
times = pd.date_range('2023-01-01', '2023-12-31', freq='H', tz=tz)

# create location object and get clearsky data
site_location = location.Location(lat, lon, tz=tz, name='Pamplona,
Colombia')
cs = site_location.get_clearsky(times)

# get solar position data
solar_position = site_location.get_solarposition(times)

```

```
# set ground coverage ratio and max_angle to
# pull orientation data for a single-axis tracker
gcr = 0.35
max_phi = 60
orientation =
tracking.singleaxis(solar_position['apparent_zenith'],
                    solar_position['azimuth'],
                    max_angle=max_phi,
                    backtrack=True,
                    gcr=gcr
                    )

# set axis_azimuth, albedo, pvrow width and height, and use
# the pvfactors engine for both front and rear-side absorbed
irradiance
axis_azimuth = 0
pvrow_height = 2.25
pvrow_width = 1.13
albedo = 0.2

# Crear arrays con orientaciones fijas cada 45 grados
Tilts = range(0, 91, 10)

# explicitly simulate on pvarray with 3 rows, with sensor placed in
middle row
# users may select different values depending on needs
for tilt in Tilts:
    surface_tilt =tilt
    surface_azimuth = 180
    irrads = pvfactors_timeseries(solar_position['azimuth'],
                                solar_position['apparent_zenith'],
                                surface_azimuth,
                                surface_tilt,
                                axis_azimuth,
                                cs.index,
                                cs['dni'],
                                cs['dhi'],
                                gcr,
                                pvrow_height,
                                pvrow_width,
                                albedo,
                                n_pvrows=3,
                                index_observed_pvrow=1
                                )

# turn into pandas DataFrame
irrads = pd.concat(irrads, axis=1)
```

```

    # using bifaciality factor and pvfactors results, create
    effective irradiance
    bifaciality = 0.75
    effective_irrad_bifi = irrad['total_abs_front'] +
    (irrad['total_abs_back']
    *
    bifaciality)

    # get cell temperature using the Faiman model
    temp_cell = temperature.faiman(effective_irrad_bifi,
    temp_air=25,
    wind_speed=1)

    # using the pvwatts_dc model and parameters detailed above,
    # set pdc0 and return DC power for both bifacial and monofacial
    pdc0 = 540
    gamma_pdc = -0.0043
    pdc_bifi = pvsystem.pvwatts_dc(effective_irrad_bifi,
    temp_cell,
    pdc0,
    gamma_pdc=gamma_pdc
    ).fillna(0)

    pdc_bifi.plot(title='Bifacial Simulation Anual', ylabel='DC
    Power', label=f'{tilt}'
    )

    hola=pdc_bifi.sum()
    print(f'Total DC Power for tilt {tilt}: {hola}')

plt.legend()
plt.show()

```

7.5 Código de la energía mensual del año 2023

```

import pvlib
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# Coordenadas de la ubicación
latitude = 7.384452657385216
longitude = -72.64785425931926

# Parámetros del panel
albedo = 0.2 # Reflectividad del suelo

```

```

module_power = 540 # Potencia nominal en W
azimuth = 180 # Orientación del panel
tilt = 12 # Inclinación del panel

# Definir el modelo de clima
times = pd.date_range(start='2023-01-01', end='2023-12-31',
freq='H', tz='Etc/GMT-5')
solar_position = pvlib.solarposition.get_solarposition(times,
latitude, longitude)

# Obtener datos de irradiancia con el modelo de cielo claro
irradianance = pvlib.irradiance.get_total_irradiance(
    tilt, azimuth, solar_position['zenith'],
solar_position['azimuth'],
    dni=1000, ghi=1000, dhi=100, albedo=albedo
)

# Modelo de eficiencia básica del panel
efficiency = 0.18 # Eficiencia estimada del panel
area = module_power / (efficiency * 1000) # Área estimada del
panel en m²

# Cálculo de la potencia generada (W)
power_ac = efficiency * area * irradianance['poa_global']

# Convertir a energía en kWh
energy_kwh = power_ac.resample('D').sum() / 1000

# Calcular energía mensual
energy_monthly = energy_kwh.resample('M').sum()

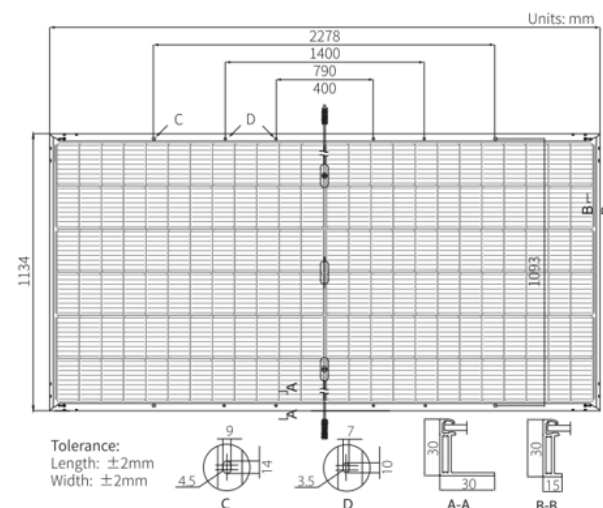
# Graficar
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(energy_monthly.index.strftime('%b'), energy_monthly,
marker='o', linestyle='-', color='#6a0dad')
plt.xlabel('Mes')
plt.ylabel('Energía (kWh)')
plt.title('Energía mensual generada por el panel solar bifacial')
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
plt.show()

# Energía total anual
total_energy = energy_monthly.sum()
print(f'Energía total anual generada: {total_energy:.2f} kWh')

```

Mechanical Parameters

Cell Orientation	144 (6×24)
Junction Box	IP68, three diodes
Output Cable	4mm ² , +400, -200mm/±1400mm length can be customized
Glass	Dual glass, 2.0+2.0mm heat strengthened glass
Frame	Anodized aluminum alloy frame
Weight	31.8kg
Dimension	2278×1134×30mm
Packaging	36pcs per pallet / 180pcs per 20' GP / 720pcs per 40' HC



Electrical Characteristics

STC : AM1.5 1000W/m² 25°C

NOCT : AM1.5 800W/m² 20°C 1m/s

Test uncertainty for Pmax: ±3%

Module Type	LR5-72HBD-540M		LR5-72HBD-545M		LR5-72HBD-550M		LR5-72HBD-555M		LR5-72HBD-560M	
Testing Condition	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax/W)	540	403.6	545	407.4	550	411.1	555	414.8	560	418.6
Open Circuit Voltage (Voc/V)	49.50	46.54	49.65	46.68	49.80	46.82	49.95	46.97	50.10	47.11
Short Circuit Current (Isc/A)	13.85	11.17	13.92	11.23	13.99	11.29	14.05	11.34	14.10	11.38
Voltage at Maximum Power (Vmp/V)	41.65	38.86	41.80	39.00	41.95	39.14	42.10	39.28	42.25	39.42
Current at Maximum Power (Imp/A)	12.97	10.39	13.04	10.45	13.12	10.51	13.19	10.56	13.26	10.62
Module Efficiency(%)	20.9		21.1		21.3		21.5		21.7	

Fuente: HI-MO LONGI LR5-72HBD 540-560M. (s. f.). Enfesolar. <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/2024/2/0mmf0ipkcc76ko/Hi-MO-5-L-Gi-LE-PM-T-PMD-059-F135-LR5-72-HBD-540-560-M-G2-a.pdf> Ficha técnica

