



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología



Maestría en
Energías Renovables

CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE PANELES FOTOVOLTAICOS BIFACIALES BAJO EFECTO ALBEDO EN SUPERFICIES DE AGUA EN UN PROTOTIPO DE AIREADOR SOLAR FLOTANTE.

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Reinaldo González Quintero
Santiago González Castaño

Director: Germán Darío Obando Bravo

Universidad del Rosario
Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología
Maestría en Energías Renovables

Santiago González Castaño

Dedico este logro en mi vida primero a Dios, a mi familia que ha sido mi soporte, compañía y apoyo para salir adelante y me ha enseñado a luchar por un ideal de manera honrada, digna y respetuosa, también dedico este logro a todas las personas que han contribuido con este gran paso en mi vida, en especial a mis profesores, compañeros de estudio y amigos ya que he aprendido bastante de ellos y me han hecho crecer como persona y futuro profesional.

Reinaldo González Quintero

Dedicado en primer lugar a Dios que me ha dado todo lo necesario para llegar hasta aquí, me ha dado la vida, las fuerzas y la dedicación, sin duda alguna no lo habría logrado sin su bendición.

A mi padre Reinaldo. Espero que desde el cielo se sienta orgulloso de este logro porque todo este esfuerzo ha sido en honor a su memoria. Quien me forjo como hombre, con su esfuerzo me dio lo mejor de sí y me dio el mejor ejemplo. Gracias porque siempre me motivaste a seguir adelante.

A mi madre Idali quien ha sido un soporte emocional cada día de mi vida, el ser que desinteresadamente ha dado tanto por mí.

A mi esposa Tatiana, mi compañera y fiel apoyo durante todo este proceso, la mujer que me ha inspirado a superarme cada vez más, a mis hijas Luciana Celeste y Ana María quienes son mi motor y llenan mis días de felicidad.

A mi familia en general porque me han brindado palabras de apoyo y aliento cuando más lo he necesitado.

A mis compañeros de estudio, especialmente a Santiago por quien tengo mucho respeto y admiración y a quien agradezco por su sincera amistad y apoyo.

Santiago González Castaño

Agradezco a Dios por todas las bendiciones que recibo día tras día.

A mis padres Gloria Inés Castaño y Jaime González por ser unos padres ejemplares, mi apoyo y motivación incondicional y por enseñarme a respetar y valorar todo lo que tengo.

Al profesor German Darío Obando Bravo por su colaboración, guía y apoyo con la realización de este proyecto.

A los profesores de la maestría por aportar su conocimiento y talento día tras día.

A Melisa Manios Cuellar mi esposa, por todo el apoyo incondicional y amor en los tiempos duros de este proceso.

A mis hermanas Catalina González Castaño y Juliana González Castaño por todas las ayudas y motivación para salir adelante en este proceso.

A mis amigos Juan David Murillo y Alexander Rodríguez Sánchez por motivarme a seguir trabajando y aclararme dudas en el desarrollo de este proyecto.

A mi compañero Reinaldo González Quintero, por toda la dedicación y colaboración en la realización del proyecto.

Reinaldo González Quintero

Agradezco a todos mis profesores por haberme ayudado a crecer profesionalmente, especialmente al profesor Germán Darío Obando por su apoyo y acompañamiento como director de este proyecto, a mis compañeros de clases por los momentos compartidos.

Agradezco a Juan David Murillo por su asesoramiento en la materialización de este proyecto.

Este proyecto estudia en qué medida la radiación por efecto albedo en espejos de agua aumenta la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos flotantes con módulos bifaciales. Para ello, se diseñó e implementó un sistema fotovoltaico bifacial sobre un cuerpo acuático. La caracterización de este sistema se hizo a través del desarrollo de un sistema de adquisición de datos capaz de tomar medidas de voltaje, corriente, potencia y energía. Los datos obtenidos fueron luego contrastados con los datos técnicos nominales suministrados por el fabricante de los paneles bifaciales empleados.

Además, se realizó un análisis del comportamiento del sistema bajo carga. Para ello, se construyó un prototipo aireador solar con sistema de almacenamiento, el cual se instaló en un estanque piscícola del municipio de Palermo, Huila. Los factores que motivaron a realizar la implementación de un aireador piscícola para hacer la caracterización obedecen al impacto ambiental que tiene estos sistemas. Buena parte de la industria piscícola en nuestro país se desarrolla en zonas rurales y apartadas del Sistema Interconectado Nacional (SIN). Por lo tanto, es común alimentar los aireadores usando generadores eléctricos a base de combustibles fósiles que producen emisiones de CO₂. Así, un estudio como el propuesto en este proyecto, puede ser un punto de partida sólido que incentive el uso de fuentes no convencionales de energía renovable para alimentar los aireadores, contribuyendo de esta forma a mitigar las emisiones de CO₂.

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2 OBJETIVOS	4
1.1 Objetivo general	4
1.2 Objetivos específicos	4
1.3 Resultados	4
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	6
Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	9
Capítulo 5 METODOLOGÍA	17
Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
Capítulo 7 CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS.....	49

LISTA DE TABLAS

vi

Tabla 1 Valores de efecto albedo en diferentes superficies. Fuente: [9]	10
Tabla 2 Obtención de valores de radiación solar global, de la base y valores de albedo. Fuente: PVsyst.....	25
Tabla 3 Presupuesto. Fuente: Autores.....	36
Tabla 4 Irradiación Albedo simulada, calculada y medida. Fuente: Autores.....	42
Tabla 5 Datasheet módulos bifaciales TSM-DEG17MC.20(II) Fuente: TRINA SOLAR.	43

Figura 1. Tipos de radiación: directa, difusa y albedo. Fuente: Autores.....	10
Figura 2. Módulos bifaciales. Fuente: Autores.....	11
Figura 3. Radiación absorbida por la cara posterior del módulo. Fuente: [11]	11
Figura 4. Selección de punto de instalación de aireador solar, simulación PVsyst georreferencia Latitud 2.8339° y Longitud -75.3564°. Fuente: PVsyst.	20
Figura 5. Irradiación horizontal global e irradiación difusa horizontal promedio diarias y mensual Fuente: Meteonorm 8.0 PVsyst.....	21
Figura 7. Comparación albedo en plano vertical vs irradiación difusa horizontal Fuente: PVsyst.	26
Figura 8. Microcontrolador ESP32. Fuente: Autores.	27
Figura 9. Sensor de Corriente ACS 712. Fuente: Autores.	27
Figura 11. Controlador de carga MPPT Epver Tracer1210AN. Fuente: Autores.	29
Figura 12. Optoacoplador 4N25 y relé SRD-12VDC-SL-C 10 Amperios. Fuente: Autores.	30
Figura 13. Diseño del circuito electrónico en Proteus 8.11. Fuente: Autores.	31
Figura 14. Modelo 3D del diseño del circuito electrónico en Proteus 8.11. Fuente: Autores.....	31
Figura 15. Prototipo Aireador Solar Flotante. Fuente: Autores.....	32
Figura 16. Prototipo Aireador Solar Flotante con módulos bifaciales. Fuente: Autores.	33
Figura 17. Prototipo Aireador Solar Flotante con módulos bifaciales. Fuente: Autores.	33
Figura 18. Caracterizaciones curvas de máxima potencia en temperatura (a) e irradiancia (b), Fuente:PVsyst.	35
Figura 19. Esquemático sistema de medición de irradiación Global y Albedo simulado Fuente: Proteus 8.13.....	38
Figura 20. Irradiación Global vs Irradiación Albedo tomadas en prueba. Fuente: Statgraphics 16.103.	38
Figura 22. Temperatura vs Irradiación Global simuladas. Fuente: PVsyst.....	41
Figura 23. Medida de Voltaje de Máxima Potencia del prototipo. Fuente: Statgraphics 16.103.	43
Figura 24. Medida de Corriente de Máxima Potencia del portotipo. Fuente: Statgraphics 16.103.	44
Figura 25. Potencia generada por los módulos bifaciales durante 2 días. Fuente: Statgraphics 16.103.	44
Figura 26. Energía generada por los módulos bifaciales durante 2 días. Fuente: Statgraphics 16.103.	46

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Es evidente la necesidad que tenemos como sociedad de hacer frente al cambio climático. Esta necesidad ha impulsado el surgimiento de alternativas de generación de energías limpias que permiten un desarrollo económico sustentable desde el punto de vista medioambiental. En consecuencia, estamos en medio de un marco propicio para plantear soluciones tecnológicas que, por ejemplo, tengan como prioridad la neutralidad de carbono mediante la reducción de las emisiones a la hora de generar energía. Desde el Acuerdo de París en 2015, se dejó en firme el compromiso para que la industria, el comercio y toda actividad humana migre hacia las energías renovables, y, de manera gradual pero acelerada, se deje atrás la generación a partir de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) [1]. Cabe resaltar que 195 países, entre los que está Colombia, hacen parte de dicho Acuerdo, en vigencia desde noviembre de 2016.

Las perspectivas para que en nuestro país se incremente la adopción de energías limpias son grandes. En particular, al hablar de energía solar, es importante destacar que Colombia tiene un potencial promedio diario multianual que ronda los $4,5 \text{ kWh/m}^2$ [2]. En consecuencia, la capacidad instalada de utilización de energía solar debería ser mayor a la que se aprovecha actualmente. Esto se debe, en parte, a que en Colombia hay pocos estudios técnicos sobre métodos de generación de energía fotovoltaica que sean más eficientes y que abarquen contextos inexplorados como lo es la radiación solar por efecto albedo en superficies de espejos de agua. En particular, no existen estudios que reporten comparaciones del rendimiento ofrecido por módulos bifaciales (que aprovechan el efecto

albedo) en contraste con módulos tradicionales monofaciales. Además, si bien es cierto que las hojas de datos de los módulos bifaciales dan cuenta de su eficiencia, no hay reportes que constaten esta información con datos obtenidos en condiciones de funcionamiento y entornos reales.

Este proyecto de investigación aplicada pretende minimizar la brecha identificada alrededor del aprovechamiento de energía fotovoltaica por efecto albedo, desarrollando una caracterización de módulos bifaciales en condiciones reales de funcionamiento. Para ello, se implementó un sistema de aireación piscícola que permite obtener datos de los módulos bifaciales que lo alimentan. Cabe resaltar que, al elegir un aireador piscícola para hacer la caracterización, se busca incentivar el uso de energías limpias para alimentar este tipo de sistemas que tradicionalmente usan combustibles fósiles y por lo tanto tienen un impacto negativo alto en las emisiones de CO_2 en el país.

En concreto, se implementó un prototipo aireador solar flotante con módulos bifaciales que permite verificar la eficiencia de captación de radiación reflejada por el efecto albedo en superficies de agua. Adicionalmente, el prototipo implementado hizo posible realizar otros análisis como la identificación de la altura adecuada de la instalación de los módulos fotovoltaicos del sistema, y la obtención de los parámetros de operación como corriente, tensión, temperatura y potencia.

Como se dijo, uno de los aspectos importantes del proyecto es que busca impactar el sector de la piscicultura en Colombia (cabe resaltar que se espera que este sector triplique su producción hacia 2030 [3]). De hecho, se espera que este proyecto se convierta en un

punto de partida que ayude a mitigar la implementación de aireadores convencionales y aireadores de tipo combustión en zonas no interconectadas.

Capítulo 2

OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Caracterizar la energía generada por los paneles fotovoltaicos bifaciales bajo efecto albedo en superficies de agua en un prototipo de aireador solar flotante.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar el modelo matemático del comportamiento de un panel fotovoltaico bifacial bajo condiciones de efecto albedo.
2. Analizar numéricamente la generación de potencia de un panel fotovoltaico bajo el efecto albedo en superficies de agua.
3. Implementar un aireador solar flotante con su sistema de monitoreo para el aprovechamiento de la radiación solar en paneles fotovoltaicos bifaciales por efecto albedo sobre superficies de agua.
4. Caracterizar la eficiencia energética del panel fotovoltaico bifacial en el prototipo de aireador flotante.

1.3 Resultados

Por medio de este proyecto esperamos poder construir un prototipo de aireador solar bifacial flotante y a través de este, poder realizar una toma de datos por medio de un sistema de monitoreo, para luego llevar a cabo un análisis cuantitativo y de este modo obtener la caracterización del módulo bifacial. Con este análisis lograremos determinar el

rendimiento de este tipo de módulos bifaciales en condiciones reales de funcionamiento de tal forma que se pueda aprovechar la capacidad que tienen dichos módulos de captar la radiación reflejada en espejos de agua por efecto albedo. También se espera poder explicar a través de un modelo matemático el comportamiento del panel fotovoltaico bifacial ante el albedo producido por un lago de producción piscícola. Además, se planea lograr analizar numéricamente la potencia que este módulo pueda generar bajo las condiciones atmosféricas del sitio seleccionado para llevar a cabo las pruebas.

Capítulo 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Las energías renovables como la eólica, solar, biomasa y geotérmica están incursionando fuertemente en Colombia y presentan un crecimiento optimista. Cada vez es más común encontrar sistemas fotovoltaicos en industrias, comercios e incluso a escala doméstica. Este crecimiento ha sido impulsado, entre otras cosas, por la implementación de políticas gubernamentales y estímulos tributarios orientados a que estas nuevas tecnologías de generación limpias ganen cada día más terreno [4].

En este marco, la investigación entorno a fuentes de energías renovables ha ganado un impulso importante generando un buen número de desarrollos tecnológicos novedosos. Entre esos desarrollos, hay algunos que han mostrado tener perspectivas interesantes. Por ejemplo, investigaciones sobre generación de energía solar en Europa revelan la ventaja de las plantas fotovoltaicas flotantes [5], un área prometedora con un gran potencial de mercado, debido a la eficiencia que representa la disminución de temperatura respecto a plantas solares en tierra. Esta disminución de temperatura es producto de los flujos de aire frío en la superficie de los cuerpos de agua, lo cual permite el enfriamiento continuo de los paneles flotantes.

Cuando disponemos de un buen recurso solar y adicionalmente la superficie sobre la cual se proyecta realizar el montaje de los módulos fotovoltaicos cuenta con una buena capacidad de reflexión de la radiación solar, se torna relevante considerar la implementación de módulos bifaciales ya que estos tienen además la capacidad de captar

la radiación reflejada a través de su cara posterior, ofreciendo una ganancia adicional en comparación con los módulos convencionales.

Los fabricantes de los módulos fotovoltaicos bifaciales proporcionan fichas de datos en donde se muestran las características técnicas de dichos módulos, tales como curvas de corriente-voltaje, potencia-voltaje, potencia máxima ($P_{m\acute{a}x}$), tensión de máxima potencia (V_{mp}), Corriente de máxima potencia (I_{mp}) y de rendimiento lineal durante la vida útil del módulo. Toda esta información, relevante al momento de seleccionar los módulos para un proyecto, es obtenida a través de pruebas de laboratorio bajo condiciones estandarizadas. Sin embargo, dependiendo de las condiciones del entorno de funcionamiento y la calidad de instalación de los módulos, su rendimiento puede fluctuar y no coincidir con los valores nominales suministrados por los fabricantes. Esto representa una incertidumbre en el cálculo de la energía que podría llegar a generar realmente el sistema que va a ser implementado.

Por consiguiente, es muy importante caracterizar el rendimiento de los módulos bifaciales bajo condiciones reales de funcionamiento en donde se explote la capacidad que tienen dichos módulos de aprovechar la radiación reflejada en espejos de agua por efecto albedo. Este estudio tiene como finalidad realizar la caracterización de un módulo bifacial a través de su implementación en un sistema de aireación piscícola.

Los aireadores piscícolas son ampliamente utilizados para mantener los niveles de oxígeno en sitios en donde no se pueden mantener de manera natural por caída de agua o renovación de esta. Las ubicaciones geográficas en donde se encuentran estos sistemas son generalmente zonas rurales y apartadas del Sistema Interconectado Nacional (SIN), por lo

tanto, es común alimentar los aireadores usando generadores eléctricos a base de combustibles fósiles, impactando negativamente las emisiones de CO_2 .

Resumiendo, el análisis y comparación de los rendimientos de módulos fotovoltaicos bifaciales permite tener una caracterización real y conocer el rendimiento efectivo de estos módulos sobre sistemas flotantes. Además, el elegir un sistema de aireación piscícola para hacer la caracterización permite dar respuesta a una necesidad del sector productivo nacional.

Capítulo 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Efecto Albedo

El efecto albedo hace referencia a la capacidad que tienen las superficies de reflejar la radiación solar. De hecho, el término albedo revela qué nivel de radiación refleja una superficie en comparación a la radiación total que recibe, por lo tanto, se indica en términos porcentuales [6]. La determinación del albedo es importante para evaluar la insolación total, además de ser uno de los parámetros más relevantes en la aplicación de modelos de balance radiactivo Tierra-Atmósfera. El albedo absoluto se puede definir como la relación entre la radiación solar reflejada por una superficie, integrada sobre todas las longitudes de onda de la luz solar, dividido entre la radiación solar incidente sobre esa misma superficie, también integrada sobre todas las longitudes de ondas de la luz solar. El albedo varía con el tipo de cubierta terrestre, la cual presenta una característica espectral y una reflectividad bidireccional propias. El albedo de un suelo varía con el color, la humedad, el contenido de materia mineral y orgánica, y el estado de la superficie. Disminuye a medida que aumenta su contenido de humedad, materia orgánica, y rugosidad de la superficie. Los suelos con tonalidades claras poseen un albedo mayor que los oscuros (opacos), por tanto, los suelos arenosos poseen un albedo mayor que los arcillosos. (Ver Figura 1) [7].

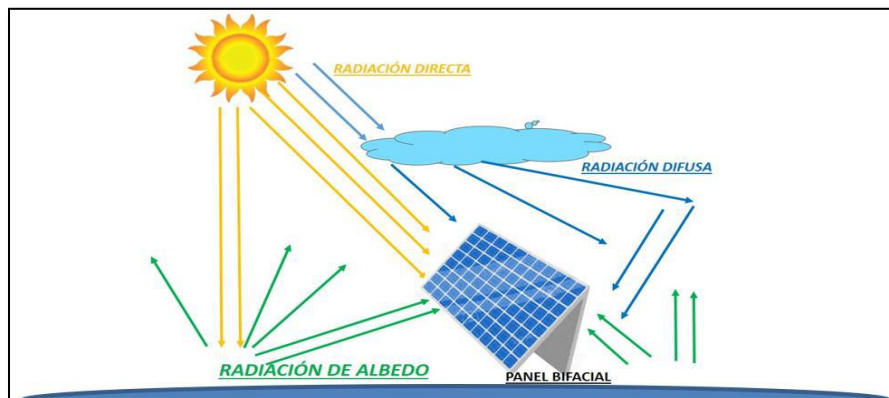


Figura 1. Tipos de radiación: directa, difusa y albedo. Fuente: Autores.

Como se dijo, la reflectancia o albedo de una superficie se mide por la relación entre la radiación incidente y la reflejada. Cuanto más reflectante es un material mayor es su valor de albedo. El albedo anual promedio de la Tierra, incluyendo la atmósfera, es del 34%. El 75% del albedo terrestre está causado por la reflexión de las nubes. Gracias a las medidas de reflexión, absorción y emisión de energía radiante de los distintos tipos de superficies en el espectro visible e infrarrojo, se puede calcular las firmas espectrales para los distintos tipos de paisajes y cubiertas vegetales de la Tierra. (Tabla 1.) [8].

Tabla 1 Valores de efecto albedo en diferentes superficies. Fuente: [9]

SUPERFICIE	ALBEDO %
Nieve fresca	80-85
Arena	20-40
Pasto	20-25
Bosque	5-10
Suelo seco	15-25
Barro húmedo	5
Agua (Sol cerca del horizonte)	50-80
Agua (Sol cerca del cenit)	3-5
Nube gruesa	70-80
Nube delgada	25-30
Tierra y atmósfera global	30

Elaborado a partir de: <http://www2.udec.cl/~jinzunza/meteo>.

Paneles Solares Bifaciales

Los paneles solares monofaciales capturan la radiación emitida por el sol a través de su cara superior y logran convertirla en un flujo de energía (electricidad), hoy en día, los paneles solares bifaciales surgen como una alternativa que permite incrementar la producción de energía fotovoltaica hasta un 30% de potencia adicional gracias a que ambas caras (superior y posterior) del panel logran absorber la energía del sol, como se puede observar en la Figura 2. Esta característica bifacial permite que este tipo de módulos ofrezcan una ganancia adicional en la generación gracias a que sus dos caras tienen la capacidad de generar. Sin embargo, estas tasas de generación adicional pueden variar dependiendo de múltiples factores [10]. En la Figura 3 podemos observar la capacidad que tiene los módulos bifaciales de absorber la radiación difusa y la radiación reflejada.



Figura 2. Módulos bifaciales. Fuente: Autores.

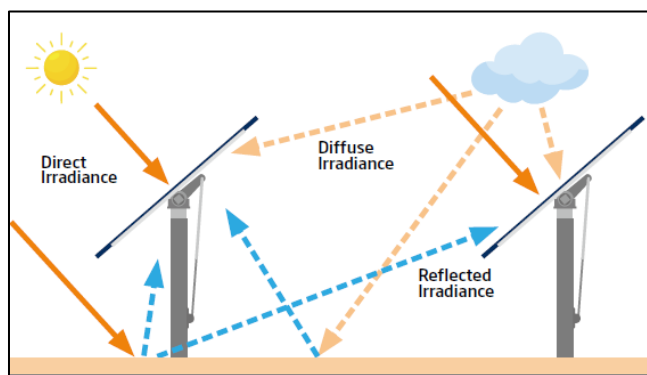


Figura 3. Radiación absorbida por la cara posterior del módulo. Fuente: [11]

Caracterización de los paneles solares

La caracterización de los módulos se llevará a cabo mediante la recolección y análisis de datos como corriente (I), tensión (V), radiación directa y radiación reflejada (albedo) además de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), es claro que estos parámetros de generación de los módulos pueden variar de acuerdo con las condiciones atmosféricas del sitio en donde se realice la instalación de estos módulos, por otra parte, la variación de la temperatura afecta directamente el rendimiento de estos módulos. Producto de la recolección y tratamiento de los datos se obtienen curvas que nos permitirán conocer el comportamiento de los paneles.

Hay pocos de estudios sobre el comportamiento de las tecnologías de módulos fotovoltaicos bifaciales para la producción energética bajo diversas condiciones medioambientales, este factor incentiva la investigación encaminada a caracterizar el uso de los módulos bifaciales sobre espejos de agua y su aprovechamiento de radiación por efecto albedo, sumado a esto, cabe resaltar que, mediante la Ley 1517 del 2014 [12], el Gobierno Nacional ha creado incentivos para la utilización e implementación de sistemas no convencionales de energía, como son los sistemas solares fotovoltaicos. Claramente, esta medida, impulsa el avance de la investigación en la aplicación de estas nuevas tecnologías de generación en el país.

Actualmente en Colombia no se han desarrollado estudios de caracterización de módulos fotovoltaicos bifaciales en espejos de agua, pero existen artículos que presentan metodologías para determinar los parámetros de módulos fotovoltaicos. Estos Artículos exponen diversas herramientas para diseñadores y proyectistas, que tienen como fin la optimización de la energía producida por los sistemas fotovoltaicos [13], el estudio “Un

estudio sobre las tasas de degradación y la linealidad de la disminución del rendimiento de varias tecnologías fotovoltaicas de película delgada” realizado por [14] presenta un análisis sobre la pérdida de rendimiento de varias tecnologías fotovoltaicas de película delgada (TFPV) en la ciudad de Jaén en Andalucía (España), en el estudio denominado *“Experiencia en el uso de la Lógica Difusa para el Control del Seguimiento de Punto de Máxima Potencia en Convertidores para Módulos Fotovoltaicos”* se presenta un estudio de un sistema de control desarrollado para la búsqueda del punto de máxima potencia en módulos fotovoltaicos [15]. También el estudio denominado *“Desempeño De Un Sistema Fotovoltaico Autónomo Frente a Condiciones Medioambientales De Una Región En Particular”* [16] expone una revisión del desempeño de los sistemas fotovoltaicos autónomos frente a las condiciones medioambientales de una región en particular. Dicho artículo presenta un método de modelado, simulación e implementación de un sistema fotovoltaico autónomo.

A nivel internacionalmente, existen artículos científicos en torno a la caracterización de paneles solares bifaciales. Por ejemplo, el estudio llamado *“Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica”* [17] analiza la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica, verificando su eficiencia en tierra. Otro estudio realizado en Cuba denominado *“Propuesta De Empleo De Energía Renovable En El Plan De Acciones De Manejo Integrado Para La Zona Portuaria De La Bahía De Santiago De Cuba”* [18], trata sobre los paneles bifaciales instalados sobre una superficie blanca. Estos módulos son capaces de captar la radiación

reflejada por la cara opuesta del panel, con lo que se puede obtener un incremento de potencia útil del orden de un 20 %.

Un estudio en Corea del Sur, denominado “*Prediction Model of Photovoltaic Module Temperature for Power Performance of Floating PVs*” [19], se analiza la temperatura en estaciones flotantes solares fotovoltaicas proponiendo un modelo y prototipo de instalación, al comparar la predicción teórica con la temperatura de operación del módulo solar en campo real, se observa que los errores del modelo correspondientes varían entre 2% y 4% dependiendo del número de coeficientes involucrados en la ecuación. Este estudio es útil en los resultados de validación de otras investigaciones que muestran que los sistemas fotovoltaicos flotantes, producen un 10% más de energía en comparación con sistemas terrestres convencionales con módulos monofaciales. En el mismo estudio Sur Coreano también se concluyó que aproximadamente dos tercios del rendimiento anual producido por los sistemas fotovoltaicos flotantes ocurren cuando la temperatura operativa del módulo era inferior a 40 °C, aunque este artículo no registra si se utilizaron módulos bifaciales o mono faciales para obtener dicho resultado. En este mismo país, se han realizado estudios para la implementación y desarrollo de la estructura modular flotante donde se instalan los módulos fotovoltaicos. En el artículo “*Design and Construction of 1MW Class Floating PV Generation Structural System Using FRP Members*” [20], los autores se centran en la fabricación de un generador fotovoltaico flotante implementando membranas con fibras de polímero reforzadas, lo cual demostró una reducción de costos y por tanto una mayor rentabilidad en la construcción del generador. La investigación no describe el rendimiento del módulo fotovoltaico, ni tampoco estudia la eficiencia

energética que le puede otorgar una estructura con diferente construcción y diferentes ángulos de inclinación de los módulos bifaciales.

Por otro lado, en Turquía el artículo *“Design and analysis of a combined floating photovoltaic system for electricity and hydrogen production”* [21], incorpora un diseño de un sistema fotovoltaico flotante para la producción de energía eléctrica e hidrógeno. Además, muestra una simulación en PVsyst (software de simulación especializado) utilizando módulos monofaciales, y concluye que el efecto de temperaturas bajas y del efecto albedo en la superficie del espejo de agua aumenta significativamente la eficiencia del sistema fotovoltaico.

En Singapur en el artículo *“Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics”* [22], muestra la recolección de datos de mediciones en campo y compara los entornos operativos de un sistema fotovoltaico en tierra y un sistema flotante, utilizando varios tipos de módulos entre ellos sistemas con celdas bifaciales, en este se analiza el rendimiento de los distintos sistemas y da a conocer los problemas encontrados, si bien los sistemas flotantes ofrecen más beneficios en la eficiencia de generación de energía, pero su distribución en el agua puede conllevar a grandes desafíos cuando se requiere aumentar el número de módulos en la planta generadora.

Para finalizar, en la India el artículo *“Experimental characterization of the performance of different photovoltaic technologies on water bodies”* [23], desarrolla el análisis del rendimiento de 3 tecnologías fotovoltaicas sobre cuerpos de agua: módulos policristalinos de silicio (Poly-Si), módulos monocristalinos (HIT) y módulos de telurio de

cadmio (Cd-Te). En el artículo se encuentra que el módulo de telurio de cadmio es más eficiente.

Capítulo 5

METODOLOGÍA

La metodología empleada en el desarrollo de este proyecto de investigación es cuantitativa, y se divide en cuatro fases principales. Iniciando con la definición del problema donde se estructuró de manera sólida el eje principal del caso de estudio, en particular la escasa documentación sobre la efectividad de sistemas que involucren el uso de paneles solares bifaciales en nuestro país y en el mundo. Teniendo esta problemática clara, se inició la fase de revisión de literatura, la cual concluyó con la elaboración del marco teórico que contiene los elementos y conceptos que se abarcan en la investigación.

En la segunda fase se definió la viabilidad de implementar el prototipo que incluye paneles bifaciales en un aireador piscícola del municipio de Palermo, Huila. Para determinar dicha viabilidad, se realizó un cálculo de radiación de albedo utilizando datos de azimut solar, elevación solar y posicionamiento geográfico coincidentes con la ubicación del proyecto. Adicionalmente, se realizaron simulaciones en un software especializado (PVsyst) para corroborar los cálculos obtenidos.

Continuando, en la tercera fase, se realizó el diseño y la implementación tanto del prototipo aireador alimentado con paneles bifaciales como del sistema de adquisición de datos. Esta fase incluye la etapa de creación de la estructura del aireador (para lo cual se empleó Solidworks), la selección y ensamble de los materiales, y la construcción de la electrónica de los sistemas de medición y recolección de datos.

La cuarta y última fase es la de obtención y análisis de los datos por parte del dispositivo ubicado en el cuerpo de agua previamente seleccionado. Este proceso encierra todo el desarrollo de la recolección de datos en campo y su posterior análisis.

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo presentaremos el desarrollo de cada una de las fases descritas en la metodología y los resultados obtenidos en cada una de ellas. Los resultados de la Fase 1, en la que se hizo una revisión del estado del arte, están reportados en el marco teórico del Capítulo 4 de este documento.

Fase 2: Estimación del albedo en el sitio de interés

Cálculo teórico

Primero, introduzcamos el concepto de reflectancia y superficie Lambertiana. La reflectancia Lambertiana es la propiedad que define una superficie ideal "mate" o reflectante difusa. El brillo aparente de este tipo de superficies, llamadas Lambertianas, es el mismo independientemente del ángulo de visión del observador. De manera más técnica, la luminancia de la superficie es isótropa y la intensidad luminosa obedece a la ley del coseno de Lambert. La reflectancia Lambertiana lleva el nombre de Johann Heinrich Lambert, quien introdujo el concepto de difusión perfecta en su libro "*Photometria*" de 1760 [26]. Una vez definidos estos términos, empezamos con el detalle de la Fase 2 de nuestro proyecto.

Como es usual, para realizar el cálculo del albedo sobre espejos de agua, se recurre a datos obtenidos a través de satélites. En esta fase del proyecto supondremos que la reflexión de la superficie terrestre es Lambertiana. Hay que puntualizar que, si bien es cierto que la radiancia en el límite superior de la atmósfera no es Lambertiana, la radiancia del satélite puede ser simulada y el albedo puede ser determinado considerando una

superficie Lambertiana. Los datos de radiación global horizontal, necesarios para el cálculo, se obtuvieron de la base de datos del software PVsyst. Para ello, se tomó la latitud y longitud del estanque piscícola designado para hacer la instalación del prototipo aireador (ver Figura 4). Como se ha dicho antes, este estanque está ubicado en el municipio de Palermo, Huila.

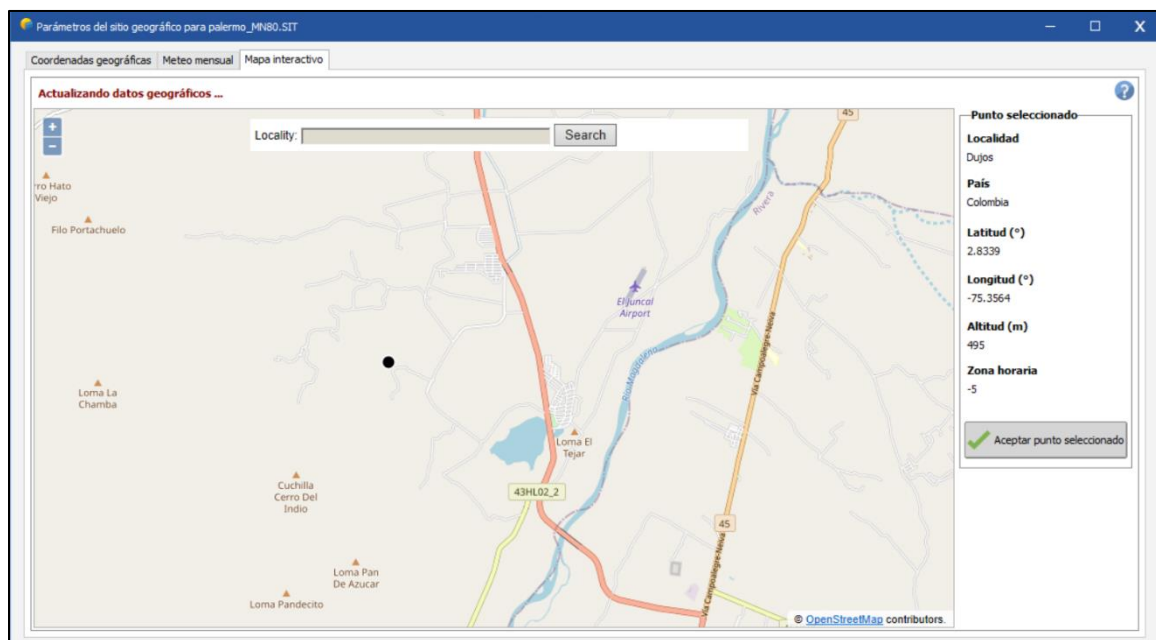


Figura 4. Selección de punto de instalación de aireador solar, simulación PVsyst georreferencia Latitud 2.8339° y Longitud -75.3564°. Fuente: PVsyst.

Desde PVsyst se importó la irradiación horizontal global y la irradiación difusa, usadas como base de cálculo del albedo. Cabe resaltar que, como describiremos en la Fase

1, este cálculo será contrastado con mediciones en campo sobre módulos bifaciales de 450W marca TRINA solar (TSM-DEG17MC.20(II)).

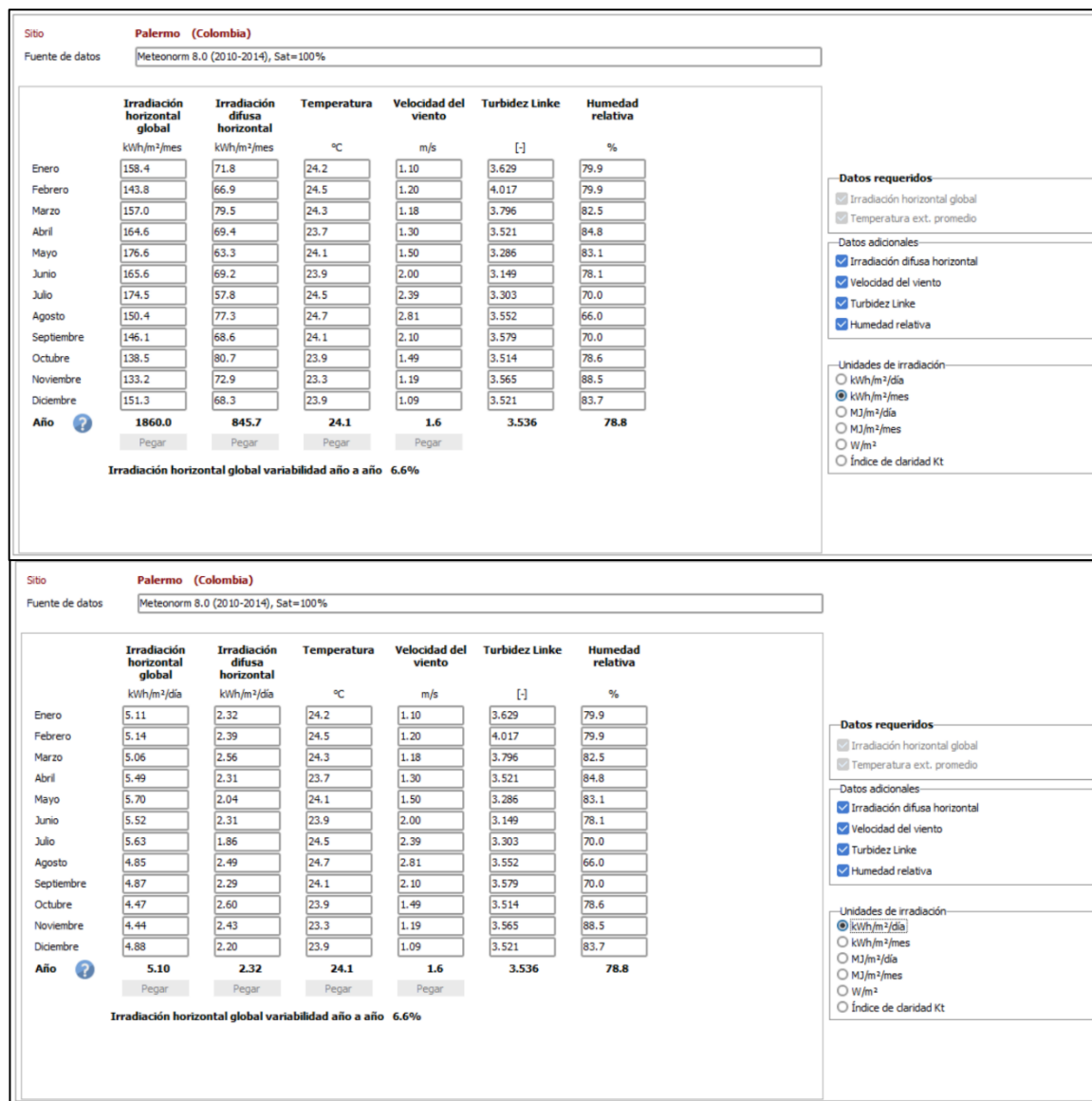


Figura 5. Irradiación horizontal global e irradiación difusa horizontal promedio diarias y mensual Fuente: Meteonom 8.0 PVsyst.

De acuerdo con los datos considerados, se puede observar que se obtiene 5.1 horas solares pico promedio anual en el punto de instalación del sistema aireador, asegurando un

recurso de 1000 W/m^2 de radiación en dichas horas solares pico asegurando el estado STC (standard test conditions) de los módulos bifaciales instalados en el prototipo.

Observando la figura 5, la radiación global horizontal para el mes de septiembre fue equivalente a $146,1 \text{ kWh/m}^2 \text{ mes}$, es decir, $4870 \text{ Wh/m}^2 \text{ día}$. Usando el modelo por factores de configuración se obtiene la siguiente expresión para el albedo:

$$AL_{\alpha\beta} = \rho * GHI * \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (1)$$

Donde

$AL_{\alpha\beta}$: Radiación Albedo reflejado por el suelo respecto a la GHI (radiación global horizontal).

ρ : % de reflexión de la superficie, para un espejo de agua en Cenit ecuatorial = 5%

β : Ángulo de inclinación del módulo fotovoltaico

GHI: Radiación global horizontal, para el mes de septiembre, $146,1 \text{ kWh/m}^2 \text{ Mes}$

Note que, para un ángulo de inclinación del módulo posterior bifacial de $\beta=170^\circ$ (esto equivale a 10° para el módulo superior), se consigue una buena eficiencia de captación de albedo. De hecho, usando la ecuación (1), para este ángulo tenemos que el albedo es:

$$AL_{\alpha\beta} = 184,96 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \text{ día}}$$

Por este motivo, se decidió construir el prototipo usando este ángulo.

Simulaciones

Posterior al cálculo del albedo solar, se procede a realizar la primera simulación del prototipo sobre un espejo de agua, suponiendo una proporción en ocupación de espejo de agua sobre estructura flotante de 2 módulos de $450 W_p$ bifaciales, con un ángulo límite de sombreado de $8,2^\circ$ de inclinación, con el fin de que la estructura flotante afecte en un mínimo porcentaje la captación de radiación albedo. El ángulo de inclinación redondeado fue de 10° a 1,2 m de altura sin afectar el rendimiento. (figura 6)

Seguidamente, el ángulo de inclinación fue calculado verificando el procesamiento de datos de optimización de inclinación en la simulación, se puede observar que una inclinación de 10° tiene una pérdida respecto al óptimo global horizontal de -0,4% con un ángulo límite de sombreado de $8,2^\circ$ el cual implica que si se instala los módulos bifaciales a ángulos por debajo a este límite no se aprovecha el lado bifacial, en comparación a los módulos monofaciales los cuales son instalados idealmente con una inclinación respecto a la latitud del lugar 2.8339° para dejar en 0% la pérdida respecto a la horizontal. En la práctica dejar una inclinación muy al horizontal por debajo de un ángulo de 10° genera empozamiento de aguas lluvias el cual no beneficia al proyecto, ni el mantenimiento del prototipo.

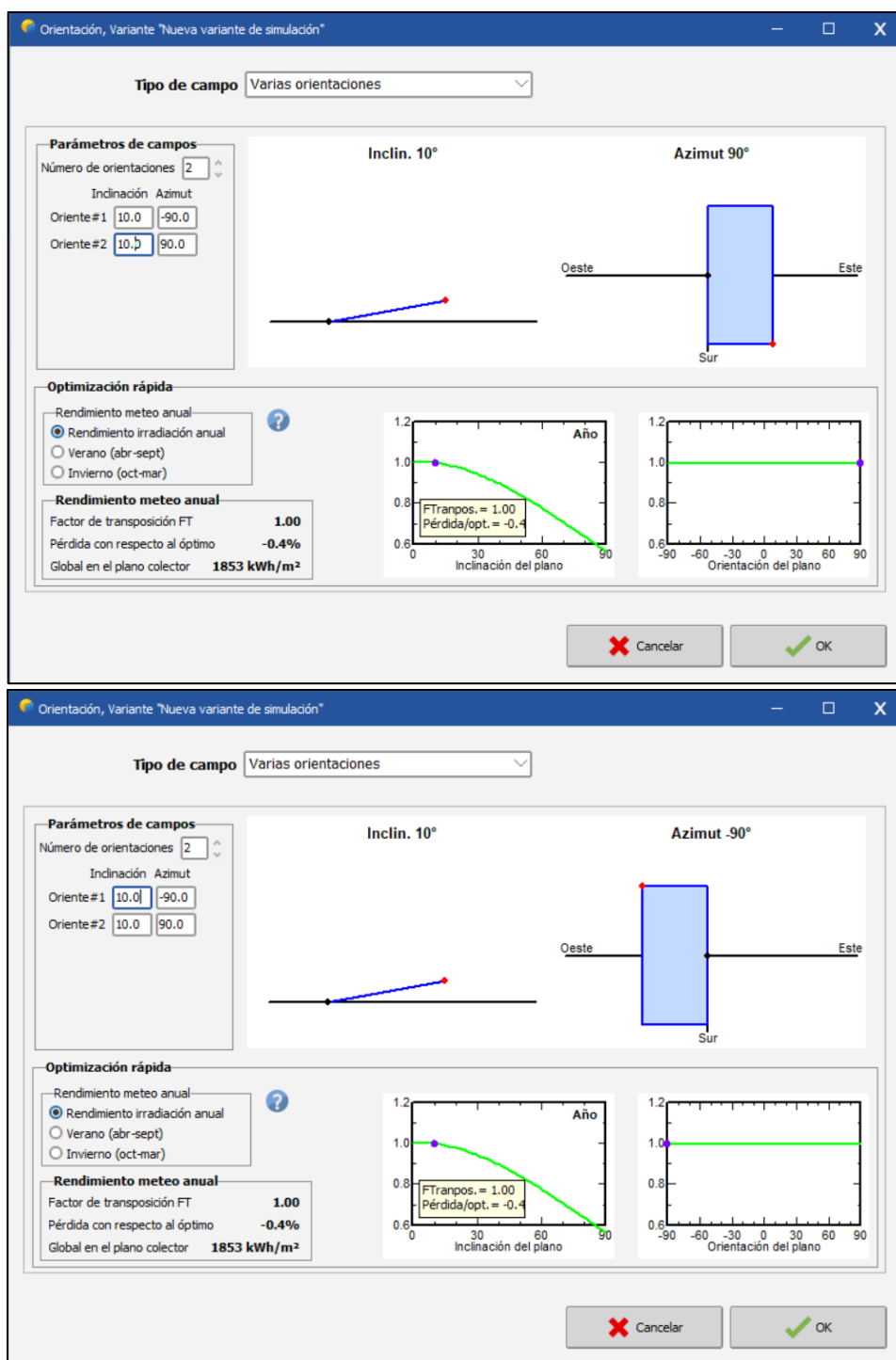


Figura 6. Variable, ángulo de inclinación 10°. Fuente: PVsyst.

*Tabla 2 Obtención de valores de radiación solar global, de la base y valores de albedo.
Fuente: PVsyst.*

Nueva variante de simulación								
Meteo y energía incidente								
	GlobHor	DiffHor	T_Amb	WindVel	GlobInc	DifSinc	Alb_Inc	DifS_GI
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	m/s	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/m ²	proporción
Enero	158.4	71.76	24.16	1.1	158.2	44.62	0.241	0.000
Febrero	143.8	66.89	24.46	1.2	143.3	41.38	0.218	0.000
Marzo	157.0	79.50	24.28	1.2	154.5	48.13	0.238	0.000
Abril	164.6	69.42	23.71	1.3	161.9	41.52	0.250	0.000
Mayo	176.6	63.28	24.11	1.5	177.5	38.83	0.268	0.000
Junio	165.6	69.20	23.86	2.0	165.1	40.97	0.252	0.000
Julio	174.5	57.76	24.50	2.4	170.5	34.04	0.265	0.000
Agosto	150.4	77.32	24.71	2.8	149.1	48.00	0.228	0.000
Septiembre	146.1	68.60	24.13	2.1	148.0	42.88	0.222	0.000
Octubre	138.5	80.74	23.86	1.5	138.4	56.34	0.210	0.000
Noviembre	133.2	72.86	23.31	1.2	133.4	49.12	0.202	0.000
Diciembre	151.3	68.26	23.87	1.1	151.4	44.58	0.230	0.000
Año	1860.1	845.60	24.08	1.6	1851.4	530.39	2.825	0.000

En la tabla 2, se obtiene el valor promedio del albedo incidente de 222 Wh/m² al día para el mes de septiembre, que es un valor cercano al calculado en la fase 2 del proyecto: 184 Wh/m², son muy cercanos, pero se deben comparar con datos de medición en el sitio el cual se realizará en la siguiente fase. En la figura 7 se observa un albedo de 216 Wh/m² simulado en el software PVsyst, el cual es muy cercano al albedo adquirido al promedio en la Tabla 2.

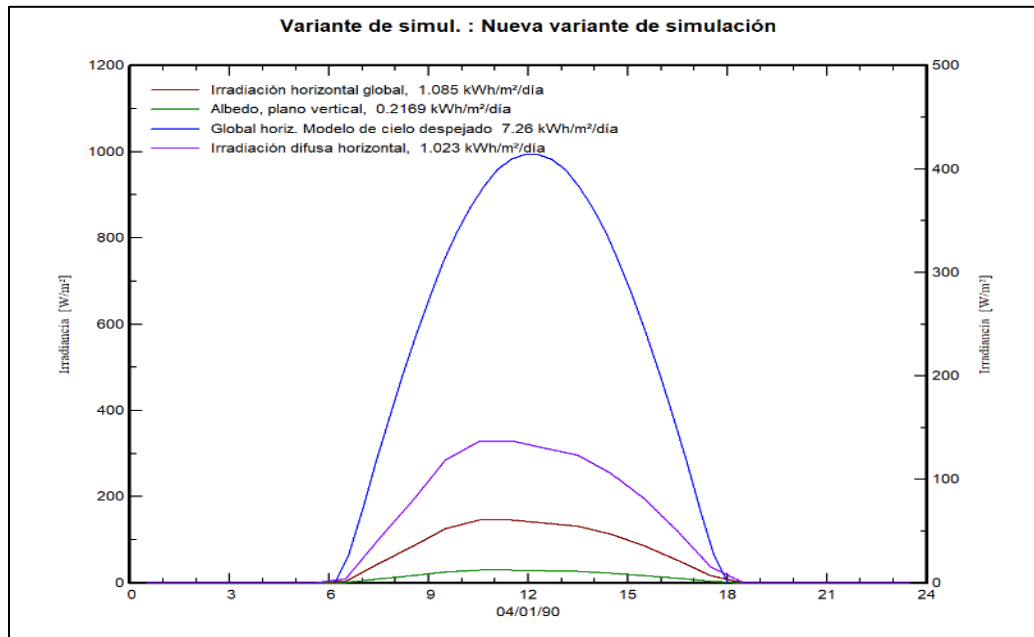


Figura 7. Comparación albedo en plano vertical vs irradiación difusa horizontal Fuente: PVsyst.

Fase 3: Diseño e implementación del prototipo

Sistema de adquisición de datos y control de carga

Para el monitoreo en tiempo real de los parámetros de tensión, corriente, potencia y energía suministrada por los módulos bifaciales del aireador, así como para controlar su carga (en este caso se trata de una bomba DC de aire de 1 hp), se implementó un sistema electrónico basado en la tarjeta de desarrollo ESP32 (ver Figura 8), la cual posee protocolos de comunicación Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE que permiten el acceso remoto a las mediciones realizadas por el sistema, y además posibilitan encender o apagar la bomba del aireador a través de una aplicación móvil. El sistema electrónico implementado está conformado por 4 módulos: medición, alimentación, potencia y comunicaciones.

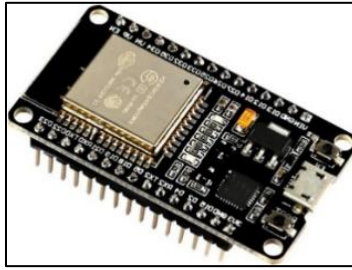


Figura 8. Microcontrolador ESP32. Fuente: Autores.

Módulo de medición: para la medición de voltaje, como las celdas bifaciales operan a una tensión de entrada máxima de 50 V (en operación STC) y la tarjeta ESP 32 trabaja con voltajes de entre 0 V y 3.3 V, se tuvo que implementar una etapa de acondicionamiento usando un divisor de tensión. Por su parte, para la medición de corriente se usó el sensor de corriente ACS712 (Figura 9) el cual puede registrar corrientes AC y DC en un rango máximo de 30 Amperios, suficiente para captar la corriente de las celdas bifaciales que, en condiciones STC, es de 10.8 Amperios. Adicionalmente, la tarjeta ESP32 se programa para calcular la potencia y la energía generada por el aireador a partir de las señales de voltaje y corriente.



Figura 9. Sensor de Corriente ACS 712. Fuente: Autores.

Una vez acondicionadas las señales y leídas por el microcontrolador ESP32 se procede a realizar el cálculo de la potencia y energía generada por el sistema aireador a partir de código en el IDE de Arduino.

Módulo de alimentación: el sistema cuenta con una batería de 12 voltios DC, que, a través de un regulador de tensión, se encarga de alimentar los circuitos y elementos electrónicos de baja potencia: el sensor de corriente ACS 712, el microcontrolador ESP32 y un lector de tarjetas SD en el que se almacenan los datos medidos. El regulador de tensión es un conversor DC-DC step-down 2596 (ver Figura 10) con las siguientes especificaciones:

- Voltaje de entrada: 3-40V.
- Voltaje de Salida: 1.5-35V (Ajustable).
- Corriente: 2A, máximo 3A.

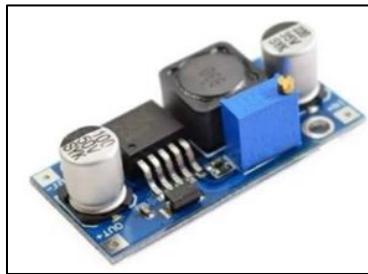


Figura 10. Regulador de tensión Arduino 3.3VDC. Fuente: Autores.

Módulo de potencia: El sistema aireador se encuentra conectado a un controlador de carga y una batería. El controlador de carga MPPT del fabricante Epverver modelo Tracer1210AN (ver Figura 11) regula la tensión y corriente de entrada de la carga que se va a manejar mediante un circuito Buck. En este caso, la carga es un motor DC de 1 hp de potencia que opera a 12 V y 6 A. Simultáneamente, el controlador brinda el nivel de tensión requerido para la carga de la batería de 12 V y 100 Ah.



Figura 11. Controlador de carga MPPT Epever Tracer1210AN. Fuente: Autores.

El sistema aireador es un sistema *Off-Grid* que idealmente va a operar en condiciones nocturnas, donde el aireamiento de geo-membranas piscícolas es óptimo (esto para garantizar la oxigenación requerida por los peces). Entonces, en el transcurso del día, el sistema debe almacenar la energía suficiente para operar mínimo 2 horas en la noche.

La tarjeta ESP32 posee puertos de propósito general (GPIO) que se pueden configurar como salidas digitales (manejan un nivel alto de 3.3V y un nivel bajo de 0 V). Es mediante una de esas salidas que el sistema diseñado controla el encendido de la bomba de aire. Para preservar la integridad de la tarjeta ESP32, es necesario aislarla del circuito de arranque del motor. Esto se logra mediante un opto-acoplador 4N35 (ver la imagen a la izquierda de la Figura 12), el cual toma la señal de control proveniente del puerto GPIO de la tarjeta ESP32 e internamente la transforma en un haz de luz. Dicho haz excita a un fototransistor, que hace las veces de interruptor para encender/apagar el motor. La señal de salida del opto-acoplador (es decir, la señal de su fototransistor interno) se conecta a un relé 12VDC SRD-12VDC-SL-C (ver la imagen a la derecha de la Figura 16) que es la interfaz final con la que se garantizan los 10 Amperios necesarios para que el motor funcione.

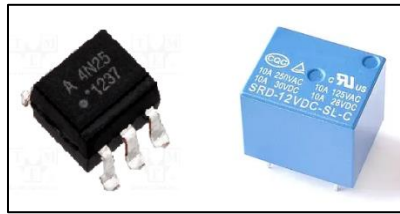


Figura 12. Optoacoplador 4N25 y relé SRD-12VDC-SL-C 10 Amperios. Fuente: Autores.

Módulo de comunicaciones: los datos medidos no sólo se almacenan en una tarjeta SD, sino también se envían a través de Bluetooth (la tarjeta ESP32 tiene hardware que incorpora los protocolos Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE). Además, a través de este mismo protocolo de comunicaciones, la tarjeta ESP32 puede recibir órdenes para poner en nivel alto/bajo la salida GPIO que controla el encendido/apagado de la bomba de aire del prototipo.

Para realizar el monitoreo remoto de los datos medidos y enviar la señal de encendido/apagado del motor del aireador se empleó la aplicación móvil Serial Bluetooth Terminal del desarrollador Kai Morich, la cual es gratuita y está disponible para dispositivos Android. Esta aplicación permite programar acciones de lectura y escritura desde y hacia dispositivos conectados a través de Bluetooth. En nuestro caso, la aplicación es la interfaz del enlace entre la tarjeta ESP32 y un celular.

La electrónica de los módulos descritos anteriormente se implementó en una placa de circuito impreso (PCB) cuyo diseño se muestra en la Figura 13. La PCB con los elementos ensamblados se muestra en la Figura 14.

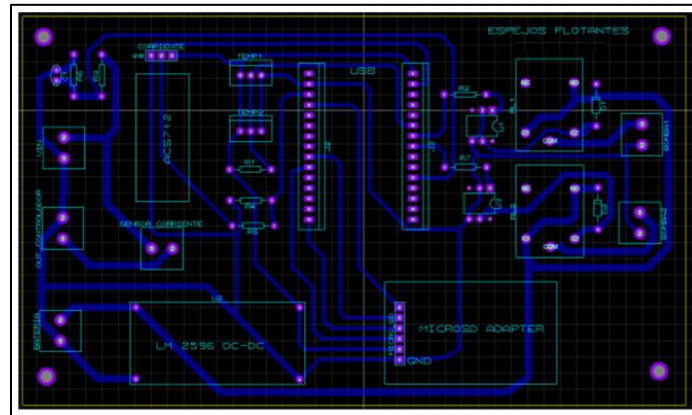


Figura 13. Diseño del circuito electrónico en Proteus 8.11. Fuente: Autores.

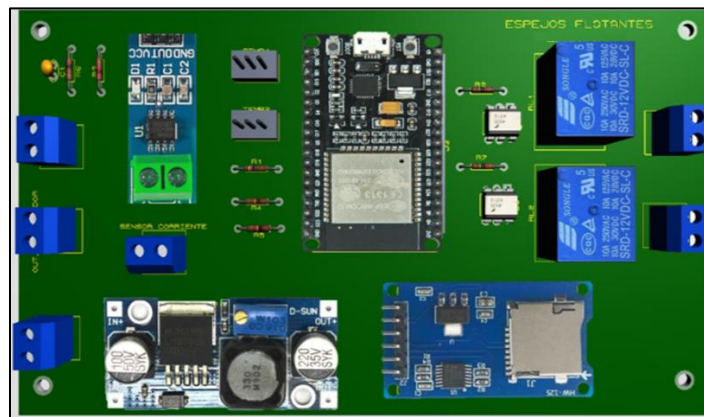


Figura 14. Modelo 3D del diseño del circuito electrónico en Proteus 8.11. Fuente: Autores.

Construcción del Aireador

En primera instancia se concibió un diseño haciendo uso de la herramienta CAD SolidWorks de acuerdo con los materiales con los que se disponían, partimos de los componentes principales como los son los módulos bifaciales, la batería, el motor y el gabinete de control y adquisición de datos. En la figura 15 podemos ver la estructura del dispositivo con todos sus componentes.

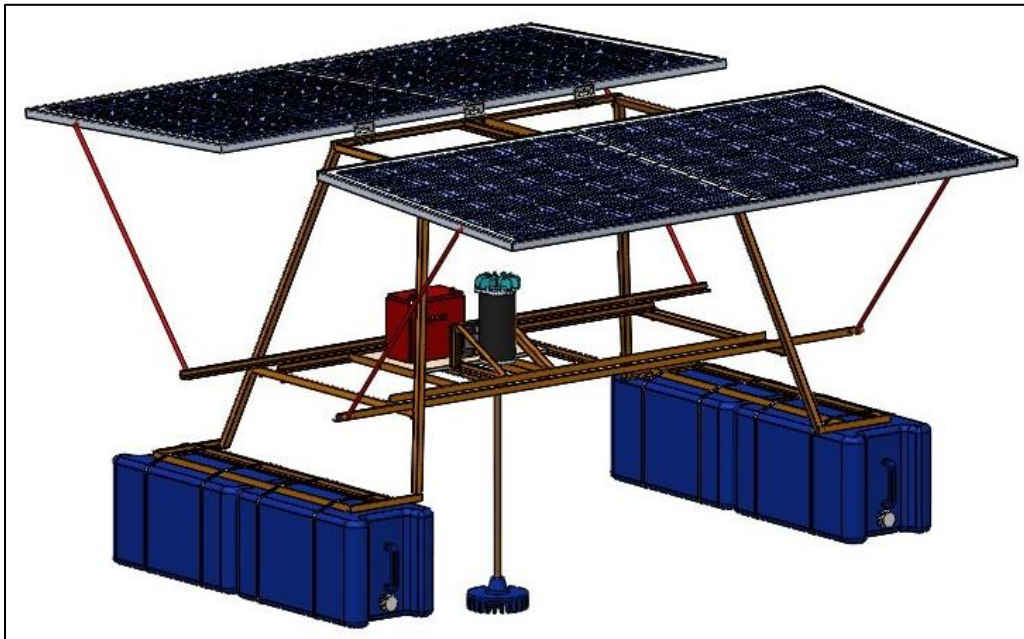


Figura 15. Prototipo Aireador Solar Flotante. Fuente: Autores.

El prototipo se construyó en una estructura de ángulos de aluminio, por sus propiedades ligeras y resistentes en comparación de otros metales y aleaciones, en busca de un buen soporte estructural para los módulos bifaciales, se optó por elaborar una estructura tipo “mariposa” que consta de bisagras laterales para anclaje y desplazamiento azimutal de los módulos fotovoltaicos bifaciales con sus respectivos parales que permitan el soporte estático en un azimut de 10° de oriente a occidente de cada del módulo izquierdo y 170° en el mismo sentido para el módulo derecho, la estructura está soportada sobre dos pares de galones plásticos vacíos cerrados herméticamente, un par para cada lado de la estructura, con la finalidad de garantizar que la estructura flote sobre el cuerpo de agua donde operará, se posicionó la estructura de soporte del motor aireador de 1 hp y la batería de carga del sistema en el centro de la estructura sobre su respectiva base, pensado eventualmente para garantizar el equilibrio de la estructura con el peso que generan estos

dos dispositivos del sistema en la ubicación designada para ellos, en la figura 16 podemos ver el prototipo ya construido y realizando la respectiva toma de datos.



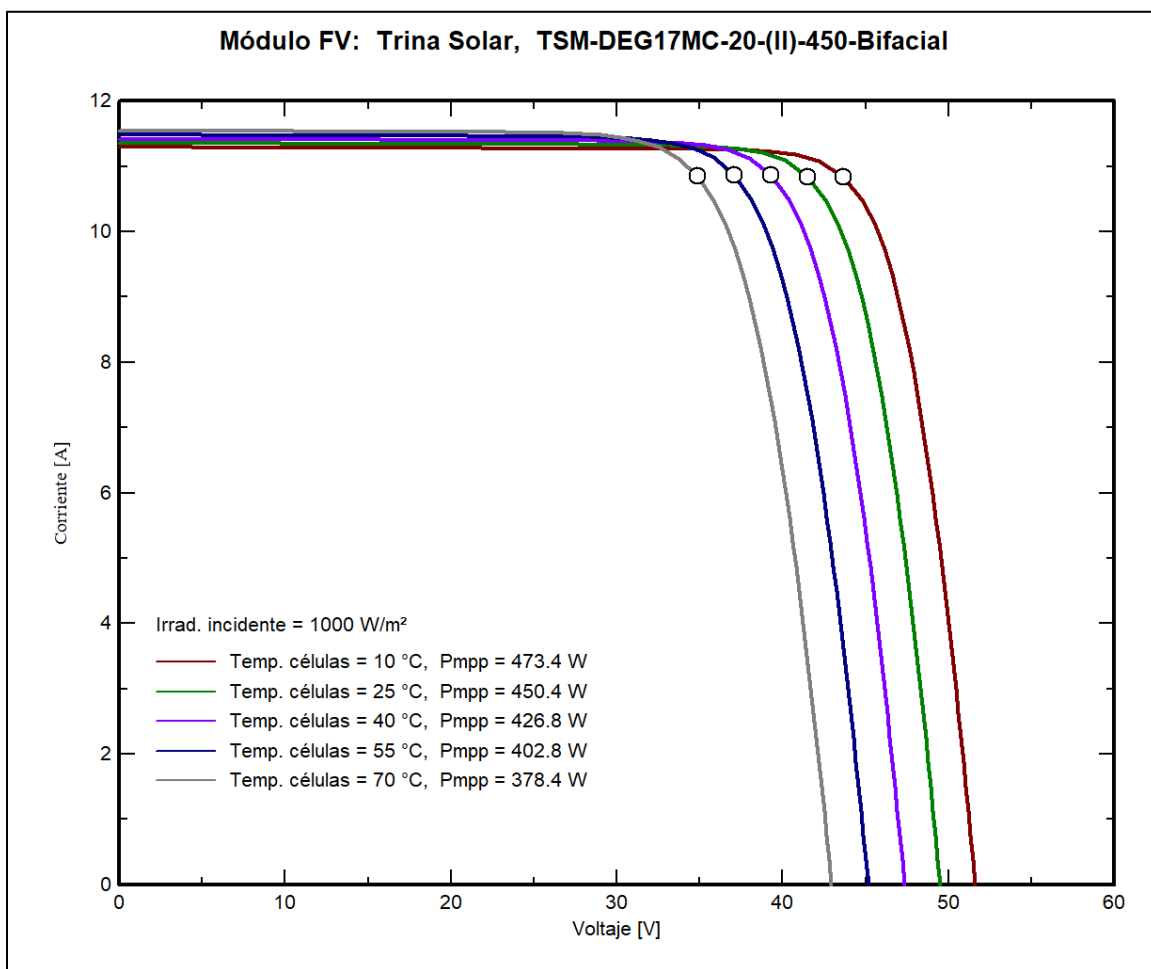
Figura 16. Prototipo Aireador Solar Flotante con módulos bifaciales. Fuente: Autores.

Finalmente, para mejorar el centro de masa del prototipo, se ancló la electrónica del sistema en la parte superior de la estructura, alojada en una caja con grado de protección IP67. Esta caja hermética evita por completo que ingrese polvo o arenillas, además protege al sistema del agua y la humedad.



Figura 17. Prototipo Aireador Solar Flotante con módulos bifaciales. Fuente: Autores.

El aireador se implementó con dos módulos bifaciales TSM-DEG17MC.20(II) de 450Wp conectados en paralelo para aprovechar la generación de máxima potencia. Debido a que la temperatura promedio del sitio donde se realizaron las pruebas es de 38,1°C y la máxima es de 70°C, según la Figura 18 (a), el prototipo es capaz de entregar una potencia entre 378.4W y 426.8W.



(a)

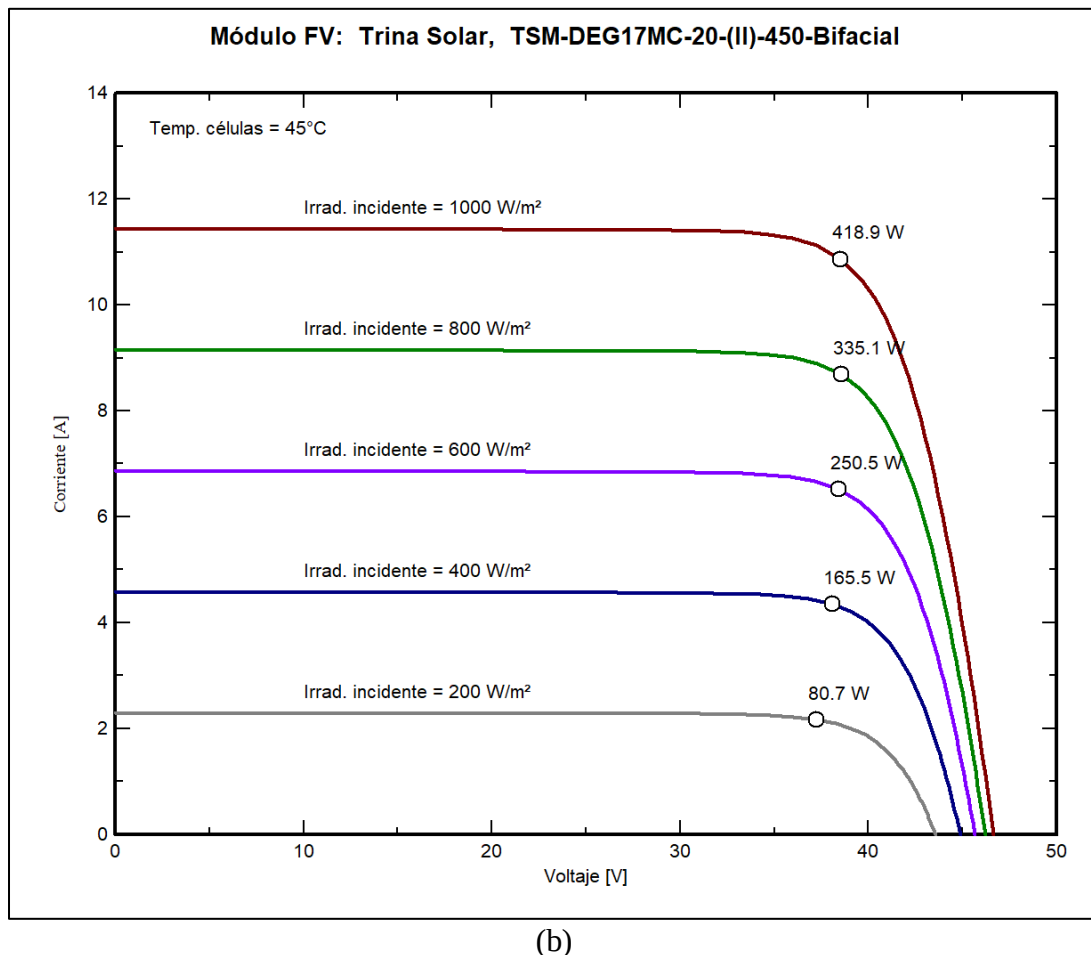


Figura 18. Caracterizaciones curvas de máxima potencia en temperatura (a) e irradiancia (b), Fuente:PVsyst.

Presupuesto:

En la Tabla 3 se hace una relación general de los costos de elaboración del prototipo en lo que tiene que ver solo con materiales sin considerar los costos de mano de obra ni costos de transporte al sitio de prueba.

Tabla 3 Presupuesto. Fuente: Autores.

Ítem	Descripción	Unidad de medida	Cant.	Precio Unitario	Precio Total
1	Batería 12VDC 100AH	Unidad	1	\$ 858.000	\$ 858.000
2	Controlador de carga	Unidad	1	\$ 1.350.000	\$ 1.350.000
3	Modulo bifacial de 450W	Unidad	2	\$ 850.000	\$ 1.700.000
4	Motor 12VDC 1HP	Unidad	1	\$ 650.000	\$ 650.000
5	Eje rotor	Unidad	1	\$ 120.000	\$ 120.000
6	Elaboración turbina aireación	Unidad	1	\$ 260.000	\$ 260.000
7	Tanques de flotación	Unidad	4	\$ 45.000	\$ 180.000
8	Perfiles y tornillería estructura prototipo	Unidad	1	\$ 720.000	\$ 720.000
9	Gabinete IP67 para electrónica	Unidad	1	\$ 250.000	\$ 250.000
10	Electrónica de control, monitoreo y adquisición de datos	Unidad	1	\$ 380.000	\$ 380.000
11	Sensores de radiación	Unidad	2	\$ 230.000	\$ 460.000
12	Bisagras	Unidad	6	\$ 22.000	\$ 132.000
				Total	\$ 7.060.000

En el siguiente enlace se puede acceder al video del prototipo en funcionamiento en el sitio de prueba en un estanque de producción piscícola:

https://uredumy.sharepoint.com/:v/g/personal/reinaldo_gonzalezq_urosario_edu_co/EYDB22-ecA9Lp2gVvOQOUfyBQIdah9yOMFvup7TfQZBsb?e=RHEkP3

Fase 4: Mediciones y análisis de los datos

Medición de irradiancia global y albedo

Para caracterizar la irradiancia global y albedo (debida al espejo de agua en el que se ubicó el prototipo implementado) se empleó un método de medición indirecta a partir de la lectura de corriente de dos celdas fotovoltaicas: una para determinar la irradiación global y otra para la irradiación albedo. Las celdas fotovoltaicas generan una tensión de 0.5 V y una corriente máxima de 400 mA. La corriente generada por los paneles ante estímulo solar es leída por módulos ACS712 y luego procesada a través de un microcontrolador, para este caso un Arduino UNO. En dicho microcontrolador, se programó un código para calcular la irradiancia a partir del nivel de tensión suministrado por los paneles, la corriente medida y el área de las celdas fotovoltaicas. En concreto, se empleó la siguiente ecuación:

$$Irradiancia \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{Potencia (W)}{Área (m^2)} \quad (2)$$

Además, se usó un sensor de temperatura DHT11 para llevar un registro de las variaciones de temperatura en el sitio de operación del prototipo. El sistema de adquisición de datos de irradiación descrito anteriormente se muestra en la Figura 19.

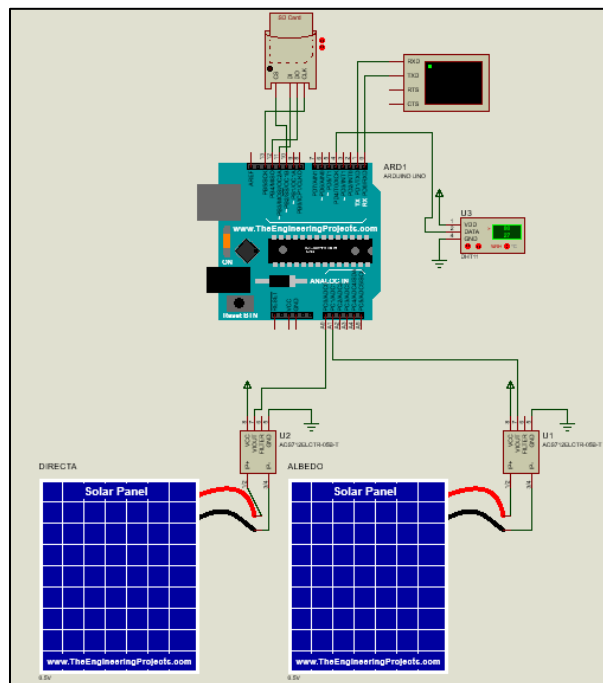


Figura 19. Esquemático sistema de medición de irradiación Global y Albedo simulado
Fuente: Proteus 8.13.

Después de poner el aireador a flote en la superficie de agua por un lapso de 10 horas, se adquirieron los registros mostrados en las Figuras 20 y 21 que corresponden a irradiación global, irradiación albedo y temperatura.

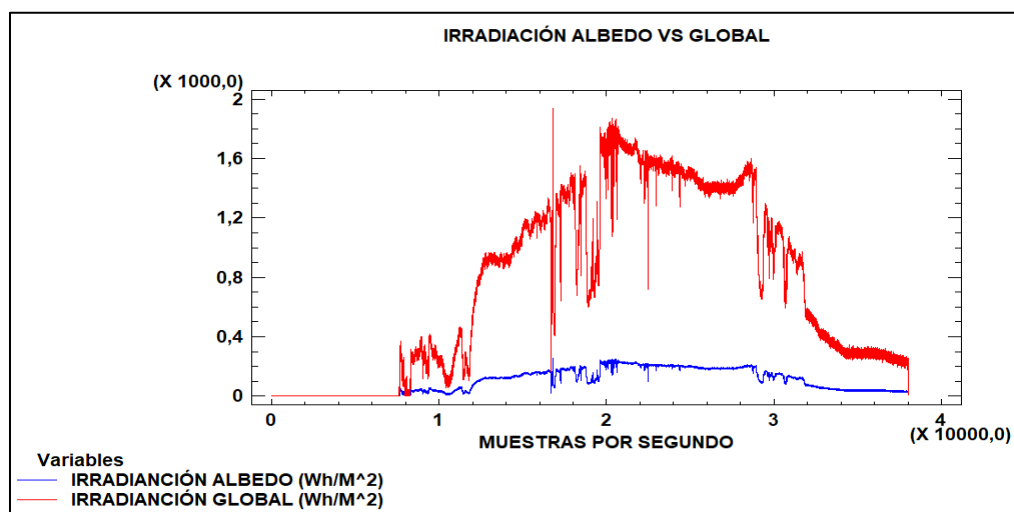


Figura 20. Irradiación Global vs Irradiación Albedo tomadas en prueba. Fuente: Statgraphics 16.103.

En total se tomaron 38029 muestras (1 por segundo durante 10,56 horas de operación del aireador). La Figura 20 plasma la toma de irradiación en un lapso horario entre las 6:00 am y 6:33 pm del día 16 de septiembre del 2022, podemos observar una “ventana” de irradiación entre las 8:00 am y 4:00 pm. Como es de esperarse, esta “ventana” es más pronunciada para la irradiación global en comparación con la irradiación de albedo captada en la superficie de agua. También puede observarse que la irradiación es más alta entre las 10:00 am y 3:00 pm, las horas solares pico. Además, se puede inferir que los grandes cambios de irradiación en este rango horario se deben a las sombras generadas por nubes.

Una vez obtenidos los datos se procede a realizar el cálculo promedio de la irradiación global y del albedo para el día de la prueba de la siguiente manera:

$$Irradiación\ GHI\ diaria\ \left(\frac{Wh}{m^2}\right) = \frac{\Sigma Muestras}{hsp \cdot 3600s} \quad (3)$$

Donde *hsp* son las horas solares pico, que, como se dijo, se producen en la franja horaria de 10:00 am a 3:00 pm, es decir, un total de 5 horas. Por lo tanto, se tiene que la irradiación global y albedo promedio en las horas solares pico para el día de prueba son:

$$Irradiación\ Albedo\ día = 207,12 \frac{Wh}{m^2}$$

$$Irradiación\ Global\ GHI\ día = 1557,294 \frac{Wh}{m^2}$$

A partir de los resultados obtenidos, se puede comparar el porcentaje de aprovechamiento del albedo frente a la radiación global medida en un sistema bifacial implementando la siguiente expresión:

$$\%Aprovechamiento_Albeo = \frac{Albedo\ día}{Irradiación\ Global\ GHI\ día} * 100\% \quad (4)$$

Por lo tanto, en nuestro caso, el aprovechamiento del albedo en el espejo de agua es del 13,3%.

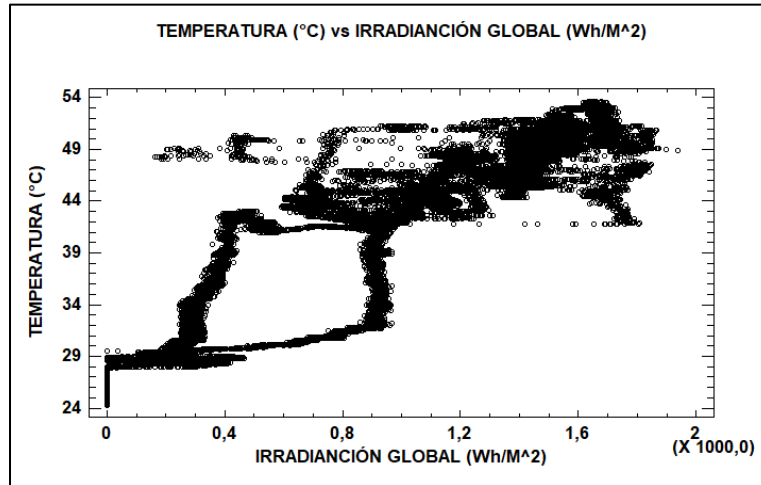


Figura 21. Temperatura vs Irradiación Global tomadas en prueba. Fuente: Statgraphics 16.103.

Efecto de la temperatura

para analizar el comportamiento de los módulos bifaciales es de utilidad graficar la temperatura de las celdas fotovoltaicas en función de la irradiación global. Como se puede apreciar en la Figura 21 encontramos gran dispersión en los datos de temperatura vs irradiación. Podemos apreciar cambios fuertes detectados por el sensor que pueden corresponder a corrientes de aire momentáneas. Cabe resaltar que para la medición de temperatura se empleó el sensor DHT11, cuyo rango de operación está limitado a 50°C. Es muy posible que, en irradiaciones altas se haya excedido el umbral de temperatura del sensor. De hecho, en la Figura 21, se puede observar una acumulación de datos alrededor del umbral del DHT11 para irradiaciones superiores a los 1000 Wh/m². Ante este inconveniente, se decidió hacer simulaciones en PVsyst, encontrándose los resultados mostrados en la Figura 22.

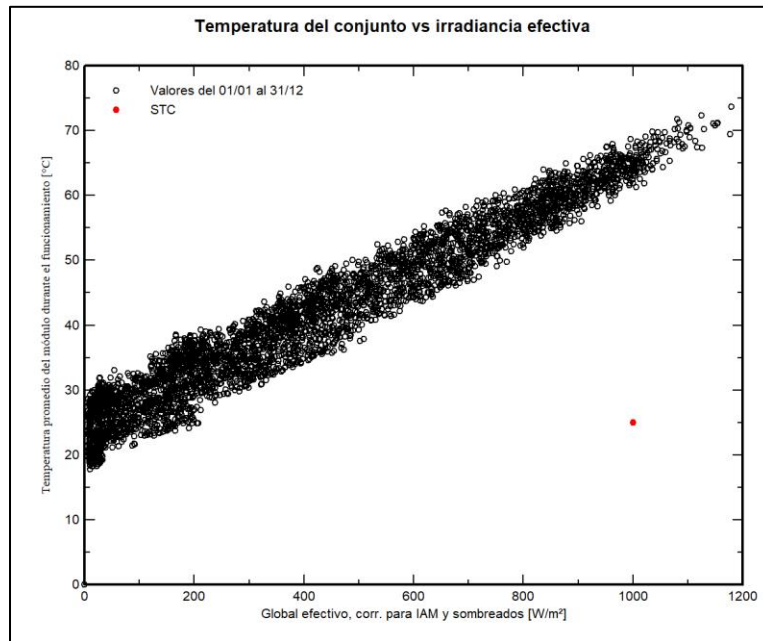


Figura 22. Temperatura vs Irradiación Global simuladas. Fuente: PVsyst.

Comparando con los resultados descritos en la Figura 22 se puede apreciar un patrón similar. En ambos casos hay una relación directa: la temperatura aumenta linealmente con el aumento progresivo de la irradiación global. De hecho, en la simulación se puede observar que esta relación irradiación-temperatura se conserva aún para temperaturas mayores a 50°C (el umbral del sensor usado).

Es importante apuntar que la temperatura puede llegar a tener una influencia adversa en los sistemas fotovoltaicos. Las altas temperaturas, en la mayoría de las ocasiones, pueden generar inconvenientes en los conductores debido al sobrecalentamiento. Esto produce aumentos de corriente y posibles fugas, poniendo en riesgo los equipos y componentes que conforman el sistema fotovoltaico. Otro aspecto para destacar es que el promedio de temperaturas medidas durante la prueba fue de 38,10°C con una desviación estándar de 9,58°C. Este resultado indica que la sensación térmica y la

climatología no necesariamente son un indicativo de los niveles de temperatura a los que se exponen las celdas fotovoltaicas. en la Ciudad de Neiva, la temperatura promedio es de 32°C, muy por debajo de la censada por el DHT11 en los módulos bifaciales.

Comparación entre Albedo Calculado, Simulado y Medido

Para estructurar un consolidado de resultados traeremos a colación los valores de irradiación albedo obtenidos matemáticamente, vía simulación y a través de las mediciones descritas en la sección anterior. El compendio de resultados se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Irradiación Albedo simulada, calculada y medida. Fuente: Autores.

Albedo promedio simulado	Albedo promedio calculado	Albedo promedio medido en prueba aireador
222 Wh/m ²	184 Wh/m ²	207,12 Wh/m ²

Podemos ver que el día de la prueba la irradiación medida promedio por efecto albedo fue de 207,12 Wh/m², menor que la obtenida en simulaciones (ver **Fase 2, Simulaciones**) que fue de 222 Wh/m², pero mayor que los 184 Wh/m² calculados usando la Ecuación (1) (ver **Fase 2, Cálculo Teórico**). Si bien los valores difieren, estas diferencias están dentro de un margen estrecho. De hecho, dicho margen puede deberse a que las mediciones se realizaron en un único día y los datos arrojados teóricamente y en simulación corresponden a valores promedio sobre todo el mes de septiembre.

Mediciones de voltaje, corriente, potencia y energía

En la Figura 23 se identifica el voltaje en las horas solares pico. Se observa que es muy cercano a los 45 V. Esta tensión es superior a la tensión de máxima potencia indicada

en las hojas de datos suministradas por el fabricante de los paneles (ver Tabla 5), la cual es de 41,7 V. Esta diferencia puede deberse a la irradiación reflejada por el efecto albedo, teniendo una eficiencia del módulo cercana al 20,4%.

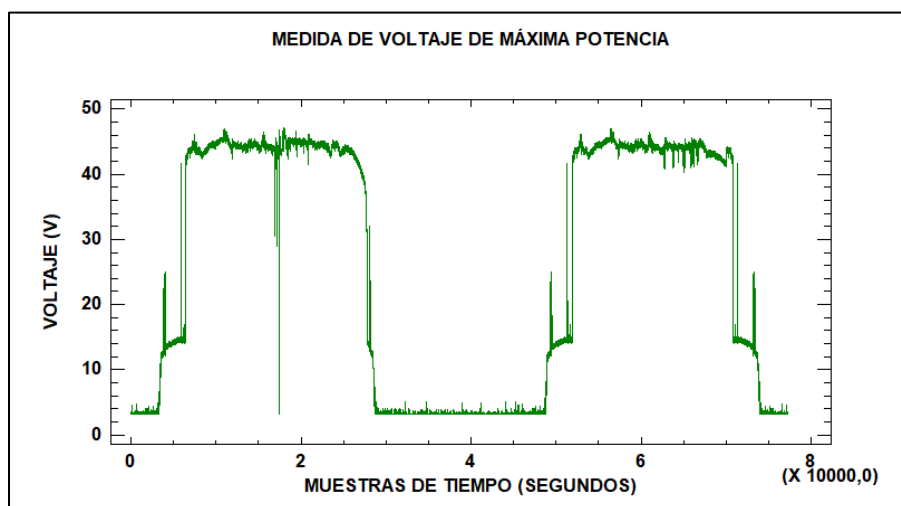


Figura 23. Medida de Voltaje de Máxima Potencia del prototipo. Fuente: Statgraphics 16.103.

Tabla 5 Datasheet módulos bifaciales TSM-DEG17MC.20(II) Fuente: TRINA SOLAR.

MÓDULOS BIFACIALES MONOCRISTALINOS					
DATOS ELÉCTRICOS (STC)					
Potencia Nominal-Pmax (Wp)*	430	435	440	445	450
Tolerancia de Potencia Nominal-Pmax (W)			0 ~ +5		
Tensión en Máxima Potencia-Vmpp (V)	40.5	40.8	41.1	41.4	41.7
Corriente en Máxima Potencia-Impp (A)	10.62	10.67	10.71	10.75	10.80
Tensión de Circuito Abierto-Voc (V)	48.7	48.9	49.1	49.3	49.5
Corriente de Corto Circuito-Isc (A)	11.20	11.24	11.28	11.32	11.36
Eficiencia η (%)	19.5	19.7	19.9	20.2	20.4
STC: Irradiación 1000W/m2, Temperatura de Célula 25°C, Massa de Aire AM1.5 *Tolerancia de Medición: $\pm 3\%$.					
Características electricas con diferentes power bin (referencia de relación de irradiancia 10%)					
Potencia Total Equivalente -P _{MAX} (Wp)	457	479	500	522	544
Voltaje Máxima-V _{MPP} (V)	40.8	40.8	40.8	40.8	40.8
Corriente Máxima-I _{MPP} (A)	11.20	11.74	12.27	12.80	13.34
Tensión Circuito Abierto -V _{OC} (V)	49.0	49.1	49.2	49.3	49.4
Corriente de Corto Circuito-I _{SC} (A)	11.80	12.36	12.93	13.49	14.05
Relación de Irradiación (Posterior/Anterior)	5%	10%	15%	20%	25%

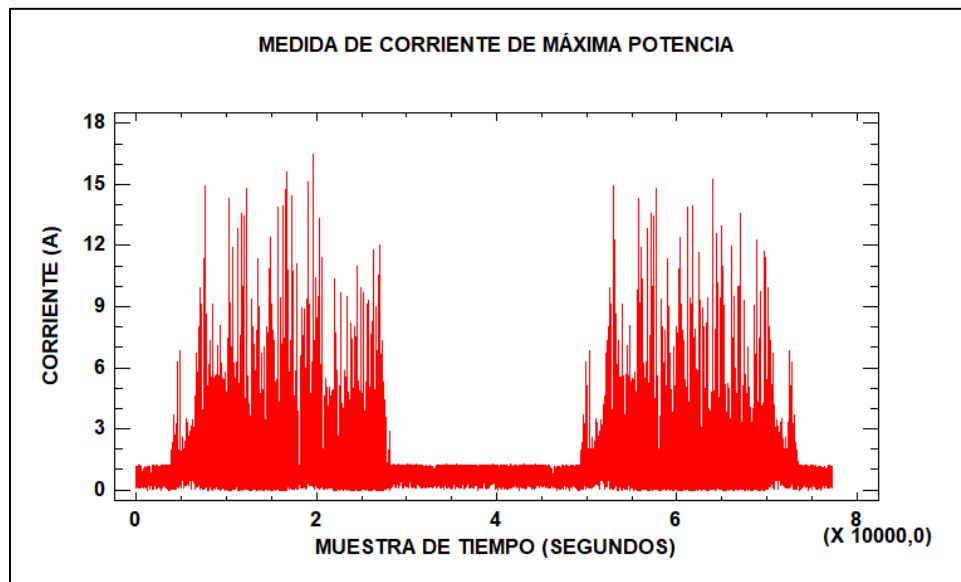


Figura 24. Medida de Corriente de Máxima Potencia del portotipo. Fuente: Statgraphics 16.103.

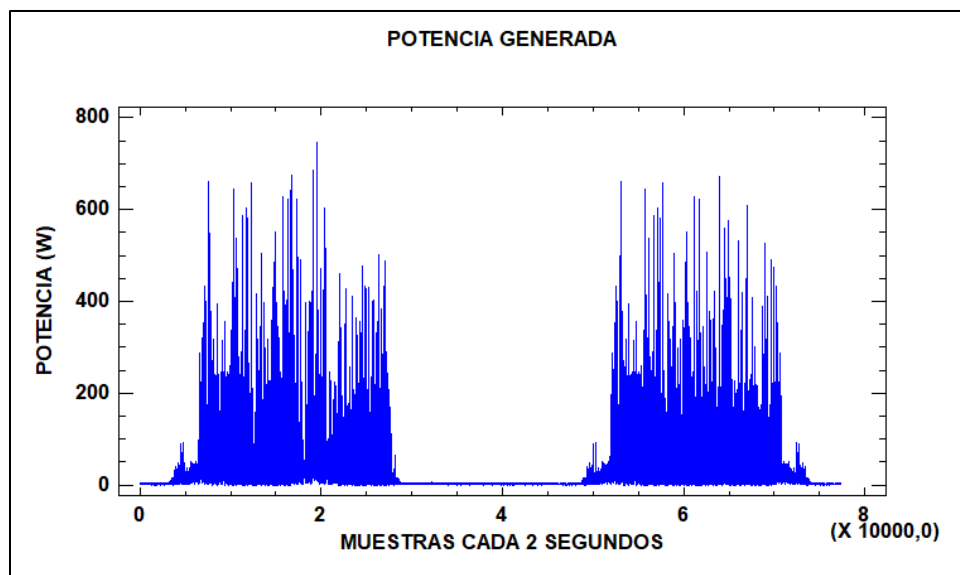


Figura 25. Potencia generada por los módulos bifaciales durante 2 días. Fuente: Statgraphics 16.103.

La Figura 25 muestra los resultados de potencia generada por los módulos bifaciales durante dos días seguidos de prueba, el 20 y 21 de septiembre de 2022. Se observan picos de potencia por encima de 600 W a corrientes variables como lo muestra la

Figura 25. Usando las siguientes ecuaciones, se realiza el cálculo estimado de la energía promedio generada en horas solares pico por los módulos y la estimación de la energía máxima generada diariamente:

$$E_{promediohora} = \frac{\Sigma P_{hsp} \left(\frac{W}{s} \right)}{180000 s} \cdot 5h \quad (5)$$

$$E_{máx} = \frac{\Sigma P_{diaria} \left(\frac{W}{s} \right)}{180000 s} \cdot 5h \quad (6)$$

El día 20 de septiembre se obtuvieron alrededor de 21000 muestras que representan la generación de potencia instantánea cada 2 segundos a partir de las 5:30 a.m. hasta las 5:45 p.m. Empleando la Ecuación (5) obtenemos que la energía promedio en horas solares pico para ese día fue de 241 *Wh*, mientras la energía máxima generada por los módulos bifaciales fue de 298 *Wh*(empleando la Ecuación (6)).

Por su parte, el día 21 de septiembre, se recopilieron aproximadamente 22000 muestras entre las 5:30 a.m. y 5:45 p.m. En este día, la energía promedio en horas solares pico fue de 229 *Wh*, y la energía máxima fue de 270 *Wh*.

Los datos obtenidos reflejan que el sistema es ineficiente en el punto de georreferenciación. Una de las posibles causas de esta ineficiencia es que el controlador de carga es muy pequeño (es un controlador que trabaja a 12 V tal y como se explicó en la **Fase 3, Módulo de Potencia**). Esto implica que la energía promedio no va a ser mayor a

300 Wh debido a la atenuación del controlador, pese a que el sistema aireador cuenta con dos módulos bifaciales de 450 W .

La Figura 26 muestra la energía total generada por los módulos bifaciales. El cálculo de energía se hace en simultáneo con la toma de muestras de potencia instantánea, y se realiza de manera automática con ayuda del microcontrolador. Las lecturas de potencia instantánea se acumulan con un espaciado temporal de 2 segundos. Al momento de apagar el sistema aireador conectado a los módulos bifaciales, la energía total generada es aproximadamente de 2.766 kWh .

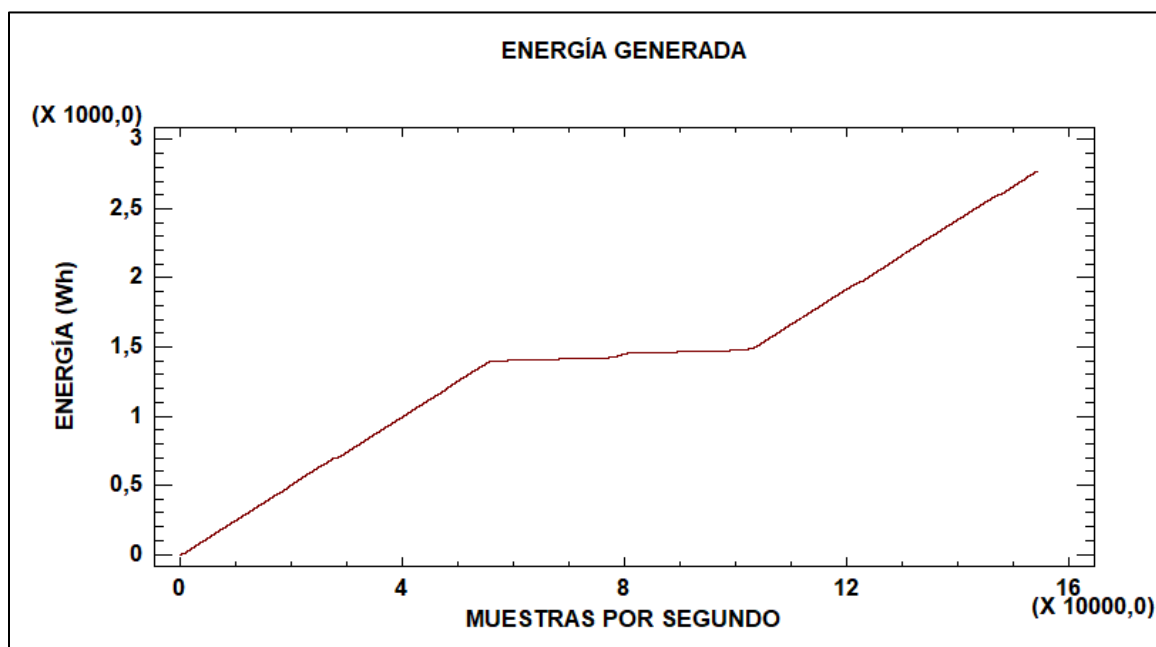


Figura 26. Energía generada por los módulos bifaciales durante 2 días. Fuente: Statgraphics 16.103.

La Figura 26 representa la energía total generada por los módulos bifaciales, este cálculo se hace en simultáneo con la toma de muestras de potencia instantánea, se realiza de manera automática con ayuda del microcontrolador el cual toma lecturas de potencia

instantánea y va acumulando las lecturas de cada muestra con un espaciado temporal de 2 segundos, lo ideal para el análisis hubiese sido optar por un periodo de muestreo de 1 segundo, pero esto significaría una alta demanda en poder de cómputo para las analíticas presentadas hasta el momento, al escogerse un tiempo de muestreo de 2 segundos es necesario hacer una reconstrucción de datos debido a que los datos recolectados representan la mitad de la actividad energética, gráficamente se apreciaría la mitad de los segundos del tiempo total del muestreo de energía, para completar las muestras de los segundos entre cada una de las leídas por el microcontrolador se gráfica y se evalúa el comportamiento de los datos tomados, se observa el patrón de las muestras, el cambio de valor entre muestra y muestra que generan las pendientes de crecimiento que toma la curva de energía por tramos y se duplica el tiempo en cada tramo de generación conservando dichas pendientes, la Figura 26 representa la energía total generada por los módulos bifaciales, refleja que el valor de energía generada finalmente al momento de apagar el sistema aireador conectado a los módulos bifaciales es aproximadamente de 2.766 kWh.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

En el proyecto, se contrastaron cálculos teóricos, simulaciones y mediciones del impacto del albedo reflejado en un módulo fotovoltaico bifacial. A través de la construcción de un prototipo aireador flotante, se logró caracterizar la potencia y la energía producida por paneles solares bifaciales sobre espejos de agua. Podemos concluir que, si bien la implementación de estos módulos bifaciales en la ubicación geográfica designada para las pruebas aumenta la eficiencia del sistema, el incremento en el rendimiento solo fue del orden del 13 %, no tan alto como se estimaba en teoría que puede ser de un 30% adicional.

El ángulo óptimo de inclinación para caracterizar un módulo solar fotovoltaico bifacial sobre una superficie de agua ubicada en el punto geográfico de interés municipio de Palermo, Huila es de 10° a una altura de 1,2 metros. Para este ángulo, la radiación de albedo en el área de incidencia es óptima con un aprovechamiento de radiación reflejada del 13,3%. Este resultado, comparado con el porcentaje de radiación reflejada en agua del 5% de albedo a un ángulo muy cerca al cenit, demuestra que el albedo varía significativamente con la posición del sol, y que el modelo implementado por “factores de configuración” con los valores obtenidos a través de mediciones es adecuado para caracterizar los módulos solares fotovoltaicos bifaciales mes a mes.

Al finalizar la construcción del prototipo y luego de realizar las pruebas de campo se concluye que el eje hueco implementado en el conjunto motor-turbina, el cual se elaboró con un tubo en acero de 1 pulgada de diámetro, no facilita la inyección óptima de aire al

cuerpo de agua por efecto Venturi. Así las cosas, se recomienda implementar un eje hueco de 2 pulgadas de diámetro. Por otra parte, debido a la dificultad para encontrar en el mercado la turbina, se tomó la decisión de construirla en pletina de 1/8 de pulgada, pero esto ocasionó que fuera muy pesada y le restó eficiencia al prototipo, se recomienda que el material de fabricación de este componente sea polietileno. Finalmente, la eficiencia del prototipo puede ser mejorada integrando un controlador de carga con más potencia o mejorando el sistema de carga a tensiones superiores, es decir, 24 V o 48 V.

REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, «Naciones Unidas,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement> . [Último acceso: 2022 10 20].
- [2] UPME-IDEAM, [En línea]. Available: http://www.upme.gov.co/docs/atlas_radiacion_solar/1-atlas_radiacion_solar.pdf. [Último acceso: 16 02 2022].
- [3] I. y. T. F. P. d. t. p. G. I. U. P. d. M. Ministerio de Comercio, «Plan de Negocios Sectorial de la Piscicultura de Colombia,» 2015.
- [4] Departamento Nacional de Planeación, «dnp.gov.co,» 05 06 2022. [En línea]. Available: <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Colombia-Energia-Renovables-en-2023.aspx>.
- [5] L. H. K. Z. W. J. L. L. Vijay Krishna, «Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics,» *ResearchGate*, pp. 957-967, 2018.
- [6] «definicion.de,» [En línea]. Available: <https://definicion.de/albedo/>.
- [7] C. C. C. L. G. K. Rodrigo Arroyo, «Modelación de albedo utilizando satélites y modelos. Diferencias y semejanzas,» Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Chile.
- [8] M. G. Cuesta, «<http://concurso.cnice.mec.es>,» [En línea]. Available: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/radi_mat.htm.
- [9] IDEAM, «www.ideam.gov.co,» 04 06 2022. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/la-radiacion-solar-y-su-paso-por-la-atmosfera>.

- [10] Iberdrola, «Iberdrola,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovacion/paneles-solares-bifaciales>. [Último acceso: 2022 10 23].
- [11] Trinasolar, «The Ultimate Guidebook for Bifacial System Desing,» p. 4, 2022.
- [12] Congreso de la Republica de Colombia, *Ley 1715*, Bogotá: Oficial, 2014.
- [13] Garcia, R. M. Arias y I. P. Abri, «Nueva Metodologia Para Determinar Los Parametros De Un Modulo Fotovoltaico/New Methodology for Obtain the Parameters of a Photovoltaic Module.,» *Ingenieria Energetica* 39.1, pp. 37-47, 2018.
- [14] J. d. I. I. R.-N. j. p. s. G. N. Ernesto M. Solís-Alemán, «Un estudio sobre las tasas de degradación y la linealidad de la disminución del rendimiento de varias tecnologías fotovoltaicas de película delgada,» *ElSevier*, pp. 813-824, 2019.
- [15] C. A. C. L. T. V. Roberto F. Farfán, «Experiencia en el uso de la Lógica Difusa para el Control del Seguimiento del Punto de Máxima Potencia en Convertidores para Módulos Fotovoltaicos,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, pp. 208-2017, 2015.
- [16] E. D. R. V. C. Obando Paredes, «Desempeño De Un Sistema Fotovoltaico Autónomo Frente a Condiciones Medioambientales De Una Región En Particular,» *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales* 40.154, pp. 27-33, 2016.
- [17] M. C. F. A. S. F. M. V. L. Raynel Díaz Santos, «Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica,» *Ingeniería Energética*, 2018.
- [18] C. Massó Bizet y J. A. Zapata Balanqué, «PROPUESTA DE EMPLEO DE ENERGÍA RENOVABLE EN EL PLAN DE ACCIONES DE MANEJO INTEGRADO PARA LA ZONA PORTUARIA DE LA BAHÍA DE SANTIAGO DE CUBA,» *Ciencia en su PC*, núm. 1, pp. 59-71, 2015.
- [19] J. R. L. C. S. W. Waithiru Charles Lawrence Kamuyu ID, «Prediction Model of Photovoltaic Module,» *Energies*, 11(2), p. 447, 2018.
- [20] S.-J. Y. W. C. Sun-Hee Kim, «Design and Construction of 1 MW Class Floating PV Generation Structural System Using FRP Members,» *Energies MDPI*, 2017.
- [21] N. J. Mert Temiz, «Design and analysis of a combined floating photovoltaic system for electricity and hydrogen production,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020.
- [22] V. K. J. L. L. T. R. L. Z. Haohui Liu, «Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics,» *Progress in Photovoltaics*, vol. 26, n° 12, pp. 955-1012, 2018.
- [23] A. K. Manish Kumar, «Experimental characterization of the performance of different photovoltaic technologies on water bodies,» *Progress in Photovoltaics*, 2019.

- [24] O. B. J. B. a. C. H. V. Naumann, «Search for Microstructural Defects as Nuclei for PID-Shunts in Silicon Solar Cells,» *IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2017.
- [25] T. O. & B. Beyza Durusoy, «Solar irradiation on the rear surface of bifacial solar modules: a modeling approach,» *Scientific Reports*, 2020.
- [26] V. E. C. R. Alain Chiron de la Casinière, *La Radiación Solar en el Sistema Tierra-Atmosfera*, Valladolid: Universidad de Valladolid, 2008.
- [27] B. Bharathiraja, T. Sudharsanaa y A. Bharghavi, «Biohydrogen and Biogas—An overview on feedstocks and enhancement process,» *Fuel*, vol. 185, pp. 810-828, 2016.
- [28] Z. Csereklyei, Q. Songze y T. Ancey, «The effect of wind and solar power generation on wholesale electricity prices in Australia,» *Energy Policy*, vol. 131, pp. 358-369.
- [29] J. A. Arboleda G., *Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades.*, Medellín, Colombia, 2008.
- [30] Celsia, «eficienciaenergetica.celsia.com,» 2017. [En línea]. Available: <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/#:~:text=Estad%C3%ADsticas%20de%20la%20Unidad%20de,julio%20a%20noviembre%20de%202017..>