

**REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA OPERACIONAL DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS MEDIANTE ENFRIAMIENTO FORZADO**



OSCAR MAURICIO RUIZ MORA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS
Y DE LA EDUCACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA
POPAYAN
2014**

**REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA OPERACIONAL DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS MEDIANTE ENFRIAMIENTO FORZADO**

OSCAR MAURICIO RUIZ MORA

Informe de pasantía como requisito parcial para optar el título de Ingeniero Físico

**Director Académico:
LUIS FERNANDO ECHEVERRI
Coordinador de Ingeniería Física**

**Director de pasantía:
Ing. PAUL ANDRÉS MANRIQUE CASTILLO
Departamento Energética y Mecánica
Universidad Autónoma de Occidente
Santiago de Cali**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS
Y DE LA EDUCACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA
POPAYAN
2014**

Nota de Aceptación:

Director _____
Ms. C. Luis Fernando Echeverri

Jurado _____
PhD. Germán Bacca Bastidas

Jurado _____
PhD. Rubiel Vargas Cañas

Popayán, (12 / 09 / 2014)

Dedicatoria

A Dios por haberme permitido lograr esta meta,
A mi familia por haberme apoyado en todo momento,
A mis profesores por haberme impartido su valioso conocimiento.
Y a las personas que me han ayudado en los buenos y malos momentos.

Agradecimientos

A Dios por la gracia espiritual y fe brindada, que me acompaña siempre en cada paso que doy.

A mi madre Fabiola Mora, por ser el apoyo incondicional en el transcurso de mi vida, y en especial en esta época de profesionalización universitaria. A ello le debo la vida y por consiguiente le debo este triunfo.

A mis hermanos, por estar presentes en el desarrollo de este proceso académico, por sus sugerencias y apoyo incondicional.

A mi padre José Ruiz, gracias por su apoyo.

A los profesores Germán B. Bastidas, Luis Fernando Echeverry y Rubiel Vargas, por su paciencia, empeño, orientación y guía para el desarrollo de este proyecto, infinita gratitud.

Al Ingeniero Paul Manrique, por ser parte fundamental y un gran apoyo en el desarrollo de este proyecto, gracias; ciertamente sus sugerencias, su paciencia, optimismo y ayuda me permitieron evidentemente la culminación del mismo.

A todos mis colegas y amigos porque estuvieron allí para apoyarme y ayudarme.

A aquellas personas quienes de una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto.

A la Universidad del Cauca, con sus profesores e instalaciones, cada uno de ellos hace parte integral de lo que hoy se demuestra y culmina en este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
CONTENIDO	6
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DE LA PASANTÍA	12
1.1. ANTECEDENTES	12
1.2. OBJETIVOS	14
1.3. DESARROLLO DE PASANTÍA	14
1.4. INSTITUICIÓN UNIVERSITARIA DE REALIZACIÓN DE LA PASANTÍA	15
1.5. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA REGIÓN	15
2. MARCO CONCEPTUAL	16
2.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (FV).....	17
2.1.1. Módulo Fotovoltaico	17
2.1.2. Modelo eléctrico de la celda fotovoltaica.....	17
2.1.3. Modelo eléctrico del módulo fotovoltaico.	20
2.1.4. Características de los módulos fotovoltaicos	20
2.1.5. Constitución y funcionalidad del módulo fotovoltaico	21
2.2. ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE LA RADIACIÓN SOLAR.....	21
2.2.1. Generalidades Radiación Solar [9].....	21
3. DISEÑO METODOLOGICO	24
3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO Y DE ENFRIAMIENTO FORZADO	25
3.2. LUGAR DE LA INSTALACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS	26
3.3. ELECCIÓN DE MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTAICOS	27
3.4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL MÓDULO FOTOVOLTAICO	28
3.5. ELABORACIÓN INTERCAMBIADOR DE CALOR PLACA-TUBO SIC1	29
3.6. ELABORACIÓN INTERCAMBIADOR DE CALOR BAJO TIERRA SIC2	30
3.7. PROFUNDIDAD PARA INSTALAR EL INTERCAMBIADOR SIC2.....	31

3.8.	BOMBA CENTRIFUGA DE AGUA.....	31
3.9.	INSTALACIÓN DE DISPOSITIVOS EN SITIO.....	32
3.8.	RECOLECCIÓN DE DATOS	33
3.8.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	33
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	34
4.1.	RADIACIÓN SOLAR EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CALI COLOMBIA	34
4.2.	DATOS TOMADOS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN ESTUDIO.....	36
4.2.1.	Datos del Módulo Fotovoltaico Sin Enfriamiento MFSE.....	36
4.3.2.	Datos del Módulo Fotovoltaico Con Enfriamiento MFCE	38
4.2.3.	Análisis del Sistema Sin Enfriamiento Vs el Sistema Con Enfriamiento.....	42
4.2.4.	Deducciones del funcionamiento de un Sistema de Enfriamiento Forzado con la carga eléctrica de la bomba centrífuga.....	43
4.2.5.	Cálculos del funcionamiento de un Sistema de Enfriamiento Forzado en una vivienda familiar.....	44
	CONCLUSIONES	46
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
	ANEXOS	52

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características del módulo Fotovoltaico HQRP de 85W	27
Tabla 2. Promedio de la temperatura y la potencia de los módulos fotovoltaicos con y sin enfriamiento	41
Tabla 3. Tabla de datos de Temperaturas, Voltajes y Potencias del comportamiento del módulo fotovoltaico sin enfriamiento	52
Tabla 4. Tabla de datos de Temperaturas, Voltajes y Potencias del comportamiento del módulo fotovoltaico con enfriamiento	53

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Módulos solares fotovoltaicos	17
Figura 2. Circuito equivalente de una celda-unidad solar fotovoltaica	18
Figura 3. Curva característica I – V de una celda fotovoltaica	19
Figura 4. Curvas características $I=f(V)$ de un módulo solar comercial	19
Figura 5. Masa del Aire determinada por posición relativa del sol respecto a la horizontal al sitio	23
Figura 6. Diagrama de actividades	24
Figura 7. Esquema del sistema solar fotovoltaico con y sin enfriamiento	26
Figura 8. Lugar de Instalación módulo solar fotovoltaico Universidad Autónoma de Occidente Cali	26
Figura 9. Cuarto técnico	27
Figura 10. Módulo Solar Fotovoltaico HQRP de 85W. (a) Información técnica, (b) Frente del módulo y celdas fotovoltaicas, (c) atrás del módulo	28
Figura 11. Tarjeta de Adquisición de Datos montada en: módulo normal y módulo con intercambiador de calor placa-tubo	29
Figura 12. Instalación del intercambiador placa-tubo de cobre.	30
Figura 13. Intercambiador de calor placa-tubo con silicona conductora	30
Figura 14. Esquema subsistema intercambiador de calor bajo tierra	30
Figura 15. Bomba Evans de ¼ HP (184 W)	31

Figura 16. Instalación módulo solar fotovoltaico en la Universidad Autónoma de Occidente Cali	32
Figura 17. Lugar de excavación e instalación del subsistema intercambiador de calor subterráneo	32
Figura 18. Analizador Solar-600	33
Figura 19. Radiación Promedio Multianual. (kWh/m ²) Del Departamento del Valle - Colombia,	35
Figura 20. Comportamiento del módulo solar sin enfriamiento	37
Figura 21. Comportamiento del módulo solar con enfriamiento	37
Figura 22. Comportamiento del módulo solar sin y con enfriamiento	39
Figura 23. Comportamiento promedio de la temperatura y potencia producida con enfriamiento	41
Figura 24. Comparación de Curvas de dispersión de la potencia producida con un sistema sin enfriamiento y otro con enfriamiento	42

INTRODUCCIÓN

La Pasantía como requisito parcial para obtener el título de ingeniero físico se entiende como, el trabajo de aplicación o práctica profesional del estudiante en un instituto universitario de investigación para desarrollar, diseñar, poner en marcha o complementar estudios de exploración o trabajo del sector estrechamente relacionado con el ejercicio de alguna de las líneas del programa ingeniería física [1], para ello se realizó en conjunto del grupo de Investigación de la Universidad Autónoma de Occidente UAO un estudio del comportamiento de la temperatura y potencia de un sistema fotovoltaico con enfriamiento forzado, haciendo uso de una idea innovadora de un sistema de refrigeración basado en intercambiadores de calor ubicados a poca profundidad de la tierra [2], [3], y [4].

El presente estudio está vinculado al proyecto macro “Reducción de la temperatura operacional de sistemas fotovoltaicos mediante el uso de energía geotérmica superficial” y en sus diferentes aspectos laboran estudiantes de pre y post grado, técnicos y docentes de la UAO, dirigido y coordinado por el Grupo de Investigación en Energías GIEN, y el Grupo de Investigación en Sistemas de Telemando y Control Distribuido GITCoD.

El Grupo de Investigación GIEN-UAO, liderado por el Ingeniero y Docente Paul Andrés Manrique Castillo, formuló la propuesta de convenio entre la Universidad Autónoma de Occidente y la Universidad del Cauca, estructurando el trabajo que se desarrolló en modalidad de pasantía mediante asesorías guiadas y prácticas en sitio; de modo que con este objetivo se alcanzó las competencias y habilidades necesarias del estudiante de ingeniería en el entorno Universidad-Pasantía; siendo esto así, este trabajo se organizó en capítulos que desarrollan la temática de la pasantía, y a continuación se presentará una breve descripción de ellos:

En el capítulo 1 de este trabajo se aborda los antecedentes, los objetivos desarrollados en la pasantía, y la ubicación geográfica de la zona de estudio, posteriormente en el capítulo 2, se relaciona el marco conceptual del funcionamiento de una celda fotovoltaica y su relación con la temperatura; entre otros, se tendrá en cuenta temas como la producción de energía solar a partir de la geo-posición de la ciudad de Santiago de Cali, así como la radiación solar que en esta ciudad se presenta de acuerdo a la información suministrada por la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia UPME, además de algunos avances tecnológicos relacionados con el enfriamiento de módulos solares, dispositivos electrónicos o lugares habitables.

En el capítulo 3, se muestra el desarrollo metodológico, en el cual se aborda los pasos que se tuvieron en cuenta para la realización del estudio en la pasantía, y se muestra un esquema que permite visualizar la configuración de los sistemas solares fotovoltaicos. También se muestra con fotografías la instalación de los sistemas fotovoltaicos así como, la ubicación y las indicaciones que se tuvieron en cuenta para el trabajo interdisciplinar con el grupo de Investigación en Energías GIEN-UAO.

En el capítulo 4 se aborda el análisis e interpretación de los datos obtenidos en el desarrollo del sistema fotovoltaico. Finalmente las conclusiones se listan en el capítulo 5 y así, se da cumplimiento a los objetivos propuestos de la pasantía.

1. PLANTEAMIENTO DE LA PASANTÍA

La Universidad Autónoma Occidente seccional Cali, bajo el proyecto de investigación y docencia en tecnología de energías alternativas, compró equipos e instrumentación, e instaló el montaje en su sede el sistema fotovoltaico, y autorizo como responsable del manejo al Líder del Grupo de Investigación en Energías GIEN-UAO para llevar a cabo el proyecto del comportamiento de la temperatura y la potencia de un sistema fotovoltaico con enfriamiento forzado. De esta forma se dio la oportunidad de la vinculación al proyecto como pasante mediante convenio interinstitucional entre la Universidad del Cauca y la Universidad Autónoma de Occidente.

1.1. ANTECEDENTES

Los módulos fotovoltaicos puestos en funcionamiento a las condiciones del clima y fuera de un ambiente controlado, evidencian un funcionamiento muy diferente al que se presenta de acuerdo a condiciones de certificación estándar. El medio ambiente al cual están sometidos los módulos está en permanente cambio, algunos de los parámetros ambientales significativos en la generación de energía fotovoltaica son la radiación, la temperatura, la velocidad del viento, la humedad entre otros. Estos cambios meteorológicos influyen finalmente en la producción de potencia del módulo solar fotovoltaico, sin embargo, los parámetros de mayor influencia en la producción del módulo son la radiación y la temperatura [3], [5]. Este efecto se puede observar en la curva corriente versus voltaje, o en la curva de potencia versus temperatura.

La radiación solar sobre el módulo fotovoltaico no es una variable a controlar, puesto que se desea tener la mayor cantidad de luz solar incidiendo en el sistema, y solo se ve disminuida por las condiciones del clima y geográficas particulares de la región.

La variable temperatura en el módulo solar es más fácil de controlar que la radiación solar, esto se hace con un sistema particular en la parte posterior del módulo, ya que el efecto de la temperatura excesiva afecta negativamente a la función del módulo fotovoltaico reduciendo así, la producción de potencia.

La respuesta a la ejecución de la propuesta de pasantía es enfriar el sistema para conseguir una mayor producción de potencia, que la que produce un sistema sin enfriamiento. Sin embargo, la propuesta de este proyecto va más allá del enfriamiento forzado del sistema, este proyecto consiste en evaluar la innovación tecnológica del depósito que hace uso de temperaturas alrededor de los 20°C a bajas profundidades en el suelo. El dispositivo no consumirá potencia producida por el módulo, porque el gradiente de temperatura hará que el flujo de calor se dirija hacia el suelo, al contrario de un sistema de refrigeración convencional que si consume potencia eléctrica.

La idea de hacer uso del suelo a bajas profundidades, y que este actúe como sumidero de calor, no es una idea desarrollada ampliamente por investigadores, ya que el mayor interés está en la producción energética a partir del calentamiento de agua en el manto de la tierra debido al calor, en cuanto a esto, las fuentes geotérmicas importantes están en lugares estratégicos sobre la faz de la tierra, ubicados tanto en longitud, latitud y a grandes profundidades, sin embargo el uso del suelo a temperaturas alrededor de 20°C a

bajas profundidades (2m a 30m) se puede ubicar en cualquier terreno con ciertas características de humedad, temperatura, entre otros.

El suelo de la ciudad de Santiago de Cali presenta características similares en todo el perímetro urbano de acuerdo a diferentes estudios realizados, por ejemplo, el Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali [6], informa sobre el número de exploraciones a diferentes profundidades, en las cuales se destaca los estudios realizados a profundidades alrededor de los 6 metros de profundidad, en donde se concluye que los materiales existentes en el área presentan permeabilidad de fluidos, dicho en otras palabras, el informe habla que la Ciudad se “caracteriza” por tres tipos de suelos, Finos, Arenas y Gravas. Los Suelos Finos presentan una humedad representativa del 40%, los Suelos Arenosos una humedad representativa del 20% y para los Suelos Gravosos del 15%. Los Suelos Finos exhiben desde una profundidad de 0 hasta 5 metros, y con menor frecuencia a mayor profundidad, sedimentos limosos y arcillosos, lo que es igual a tener formaciones con gran capacidad de almacenar agua, pero con dificultad para transmitirla [7], esto según la cátedra del docente Raúl Espinace Abarzúa, de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. Del mismo modo el Estudio de Suelos y Diseño de Pavimentos Estación de Cañaveralejo [8] confirma el tipo de suelos adicionando el hallazgo de agua libre a profundidades comprendidas entre 2,3 y 4,8 metros.

Por otro lado, el Dr. Hong Yuping, Erich Mands y otros autores, afirman que el subsuelo se puede usar como ambiente climatizador o intercambiador de calor de otros dispositivos y entornos habitacionales útiles al hombre, [9] y [10]. Además el Dr. Mands propone un perfil de temperatura del suelo hasta la profundidad de 16 metros, el cual varía según los sedimentos y formaciones de los estratos, sin embargo establece que el subsuelo maneja temperaturas cercanas a la del ambiente e inclusive inferiores, teniendo en cuenta la profundidad.

Según lo anterior, y teniendo en cuenta que la presencia de agua permite la climatización, y/o su uso en intercambiadores de calor, se propone en este trabajo usar el subsuelo de un espacio dentro de la Universidad Autónoma de Occidente de la Ciudad de Cali, como un intercambiador natural de calor. Además, se espera que el flujo de calor del fluido se dirija al ambiente del subsuelo sin ningún tipo de consumo eléctrico.

En el desarrollo de la pasantía se evaluó la potencia producida por dos módulos solares fotovoltaicos. Uno de los módulos utiliza un sistema general de refrigeración (SR) y este a su vez consta de dos sistemas de refrigeración SR1 y SR2. El sistema de refrigeración 1 (SR1) es un intercambiador de calor ubicado en la parte posterior del módulo fotovoltaico con una placa-tubo, en el cual fluye agua y absorbe el calor, refrigerando el módulo, el sistema de refrigeración 2 (SR2) es un intercambiador de calor ubicado a una profundidad determinada en el suelo, el cual permite la disipación del calor del agua en el ambiente del terreno. Finalmente, el agua fría sale del intercambiador en el suelo, y es ingresada nuevamente a la placa-tubo ubicada en el módulo fotovoltaico, mediante el uso de una bomba, permitiendo así, la circulación continua de agua y manteniendo el módulo fotovoltaico refrigerado.

Para lograr los objetivos se hizo uso de información de artículos, libros, y de la guía experimentada en el campo por el Director de pasantía, así como de trabajos previos realizados propios de la Universidad Autónoma de Occidente Cali.

1.2. OBJETIVOS

Evaluar la potencia producida en el comportamiento de un módulo solar fotovoltaico con enfriamiento forzado acompañado de un subsistema de intercambiador de calor ubicado a baja profundidad en el suelo.

Establecer experimentalmente el efecto del incremento de la temperatura en módulos fotovoltaicos, analizar, evaluar y calificar la viabilidad del proceso de enfriamiento forzado de dispositivos fotovoltaicos afectados por la temperatura ambiente.

1.3. DESARROLLO DE PASANTÍA

El Ingeniero y Docente Paul Andrés Manrique Castillo adscrito al grupo de Investigación en Energías GIEN-UAO de la Universidad Autónoma de Occidente Cali, formuló la propuesta de convenio entre la Universidad Autónoma de Occidente y la Universidad del Cauca, para la aceptación de practicantes en procesos de colaboración y desarrollo institucional, y estructuró el trabajo a desarrollarse en modalidad de pasantía, para complementar el trabajo que ya se había puesto en marcha sobre el estudio de sistemas fotovoltaicos en la Universidad Autónoma de Occidente, y de modo que, el estudiante de ingeniería física cumpla con los objetivos y adquiera las capacidades necesarias para desarrollarse a nivel profesional, y así finalmente obtener el grado de Ingeniero Físico de la Universidad del Cauca.

Para la ejecución de la pasantía se realizó un estudio documental y de aplicaciones prácticas en los laboratorios de la Universidad Autónoma de Occidente Cali. Aprovechando los laboratorios de circuitos eléctricos y electrónica, de eficiencia energética y energías alternativas, equipos de medición de radiación y analizador de parámetros de módulos solares, multímetros, entre otros y demás materiales suministrados por la Universidad Autónoma de Occidente Cali, que permitieron recopilar los datos necesarios para el análisis y la interpretación de la información.

1.4. INSTITUIÓN UNIVERSITARIA DE REALIZACIÓN DE LA PASANTÍA

“La Universidad Autónoma de Occidente es una Institución de Educación Superior de carácter privado, cuya misión es la de integrar, con perspectiva internacional, las funciones sustantivas de docencia, investigación y proyección social para contribuir a la formación de personas con visión humanística, creativas y emprendedoras, a la generación de conocimiento y a la solución de problemas del entorno regional, nacional e internacional”. La visión de la UAO es, “Ser una universidad consolidada, con desarrollos organizacionales propios de una institución reconocida regional y nacionalmente, y cuya proyección internacional garantice la excelencia en sus programas de formación, la calidad y pertinencia de su investigación y proyección social, y un alto nivel de integración de sus egresados con la sociedad en que viven y laboran”¹.

1.5. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA REGIÓN

“Localizado al suroccidente de Colombia, entre la cordillera central y el océano Pacífico, el Valle del Cauca es el departamento colombiano que alberga a Santiago de Cali, ciudad capital, tercera más importante del País, en donde se encuentra ubicada, a su vez, la Universidad Autónoma de Occidente.

Por su geografía y disposición estratégica esta región ha tenido desde siempre una importante participación en el desarrollo de la nación, y ha estado a la vanguardia en el ámbito educativo, deportivo y empresarial. Limita al norte con Chocó y Risaralda, al sur con Cauca, al oriente con Quindío y Tolima y al occidente con el océano Pacífico”².

¹ <http://www.uao.edu.co/la-universidad/mision>

<http://www.uao.edu.co/la-universidad/vision>

² <http://www.uao.edu.co/la-universidad/ubicacion-geografica>

2. MARCO CONCEPTUAL

De los autores Hernández, Pereda y Rogelio se establece que “La celda fotovoltaica está formada por un material semiconductor. La conversión fotovoltaica es un proceso físico que consiste en la transformación de la energía proveniente de la radiación electromagnética, en energía eléctrica cuando es absorbida por un determinado material. Este proceso depende tanto de la intensidad de la radiación incidente como de las propiedades intrínsecas del material.” [11]

Se comenta en la literatura que la mayoría de celdas comerciales están fabricadas con semiconductores a base de silicio, y al que se le adiciona elementos como boro y fósforo para obtener el mecanismo eléctrico por el cual fluyen los electrones. Los contactos eléctricos añadidos al semiconductor son dos láminas metálicas sobre ambas caras de la celda permitiendo la conexión con otros dispositivos. En la cara iluminada, la lámina se deposita en forma de rejilla, pues se debe dejar al descubierto la mayor parte de su superficie para que penetre la luz en el semiconductor. La corriente fotovoltaica generada en la célula sale por uno de los contactos, atraviesa la carga y vuelve al otro contacto iniciando una corriente eléctrica continua [12] [13].

El proyecto SIMEC CHILE SRL [14] afirma, acerca de una celda comercial estándar, con un área de unos 100 cm^2 , suficientemente iluminada es capaz de producir una diferencia de potencial de 0.5 V y una potencia pico de 1,5 Wp,

El silicio utilizado actualmente en la fabricación de las celdas que componen los módulos fotovoltaicos se presenta en tres formas diferentes [12]:

- Silicio monocristalino. En este caso el silicio que compone las celdas de los módulos es un único cristal. La red cristalina es la misma en todo el material y tiene muy pocas imperfecciones. El proceso de cristalización es complicado y costoso, pero sin embargo, es el que proporciona la mayor eficiencia de conversión de luz en energía eléctrica.
- Silicio policristalino. El proceso de cristalización no es tan cuidadoso y la red cristalina no es la misma en todo el material. Este proceso es más barato que el anterior pero se obtiene rendimientos ligeramente inferiores.
- Silicio amorfo. En el silicio amorfo no hay red cristalina y se obtiene un rendimiento inferior a los de composición cristalina. Sin embargo, posee la ventaja además de su bajo coste, de ser un material muy absorbente por lo que basta una fina capa para captar la luz solar”.

2.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (FV)

2.1.1. Módulo Fotovoltaico

“El módulo solar fotovoltaico es el encargado de convertir la radiación solar en electricidad. Según el uso que se le da a esta energía se debe tener en cuenta las características de voltaje y corriente; estas características dependen de la cantidad de radiación solar incidente, de la temperatura, de factores meteorológicos y de parámetros de construcción del módulo. Los módulos pueden variar según el fabricante y la habilidad de obtener energía según la instalación. En la Figura 1 se muestra la instalación de varios módulos a lo cual se le conoce como generador fotovoltaico o simplemente módulos solares fotovoltaicos. Un módulo generalmente consta de varias celdas fotovoltaicas conectadas en serie o paralelo. En general, las celdas fotovoltaicas poseen potencias nominales próximas a 1 Watt con una radiación de 1000 W/m^2 , que proporcionan un voltaje máximo del orden de 0,5V, por esto se conectan varias unidades en serie o paralelo, según las necesidades de voltaje y potencia. “



Figura 1. Módulos solares fotovoltaicos

2.1.2. Modelo eléctrico de la celda fotovoltaica

La operación de una celda fotovoltaica se modela con un circuito equivalente mostrado en la Figura 2 [11]. En dicha figura, la celda se representa mediante un generador de corriente asociado con una resistencia en serie, otra en paralelo y un diodo.

Los componentes de la Figura 2 son:

- Resistencia en serie (R_s), permite considerar las pérdidas de potencia debido a los contactos eléctricos y a la resistencia del silicio al movimiento de los electrones.
- Resistencia en paralelo (R_p), permite considerar las pérdidas en la unión P-N, ya que por ella circula la corriente I_p .
- Corriente generada (I), es la corriente a la salida de la celda fotovoltaica.

- Corriente fotovoltaica (I_L), es la corriente generada debido a la incidencia de la luz solar en la celda fotovoltaica, la cual es proporcional a la irradiancia (potencia de la radiación solar por unidad de superficie, medida en W/m^2).
- Corriente de diodo (I_D), es la corriente del diodo equivalente polarizado en directa.

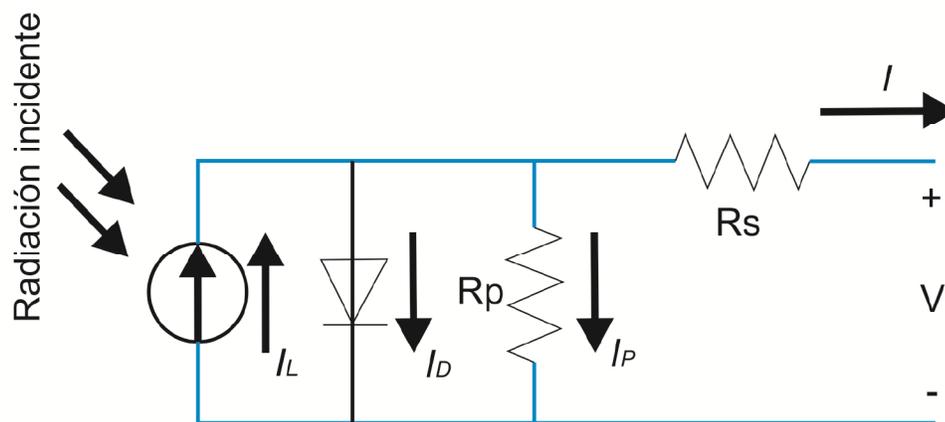


Figura 2. Circuito equivalente de una celda-unidad solar fotovoltaica

En el circuito equivalente se cumple:

$$I = I_L - I_D - I_p \quad (1)$$

Si se toma la Ecuación 1, y se calcula, la potencia generada por la celda fotovoltaica se obtiene el voltaje de salida, es posible construir las curvas que representan las características corriente – voltaje $I = f(V)$, potencia-voltaje $P = f'(V)$ de un celda fotovoltaica, ver Figura 3.

Los parámetros más importantes de la celda fotovoltaica son los siguientes:

- Corriente de cortocircuito (I_{SC}): Es la corriente en la celda cuando sus bornes están cortocircuitados ($V = 0$).
- Voltaje de circuito abierto (V_{OC}): Es el voltaje cuando no hay ninguna carga conectada ($I = 0$).
- Potencia máxima, P_{max} : Es el máximo de la función $P = I \cdot V$. Para este punto se obtiene la corriente de potencia máxima (I_{max}) y la del voltaje de potencia máxima (V_{max}).

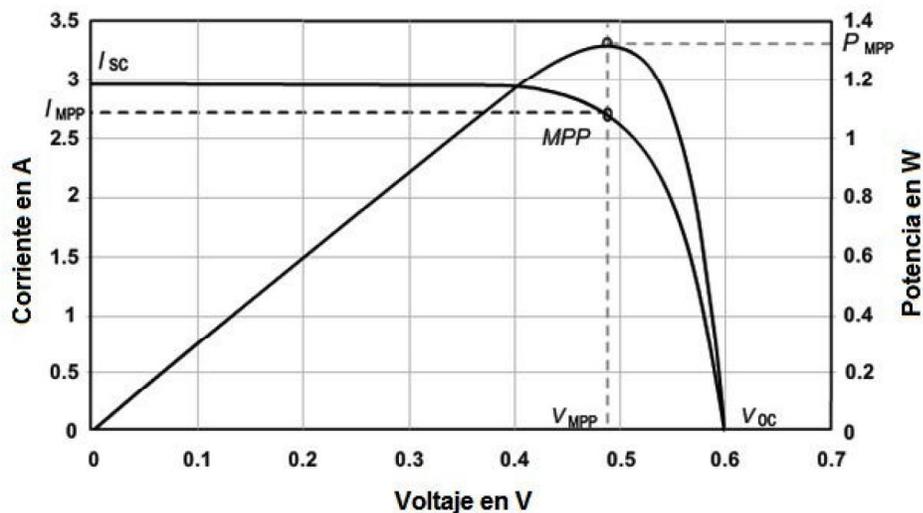


Figura 3. Curva característica I – V de una celda fotovoltaica³

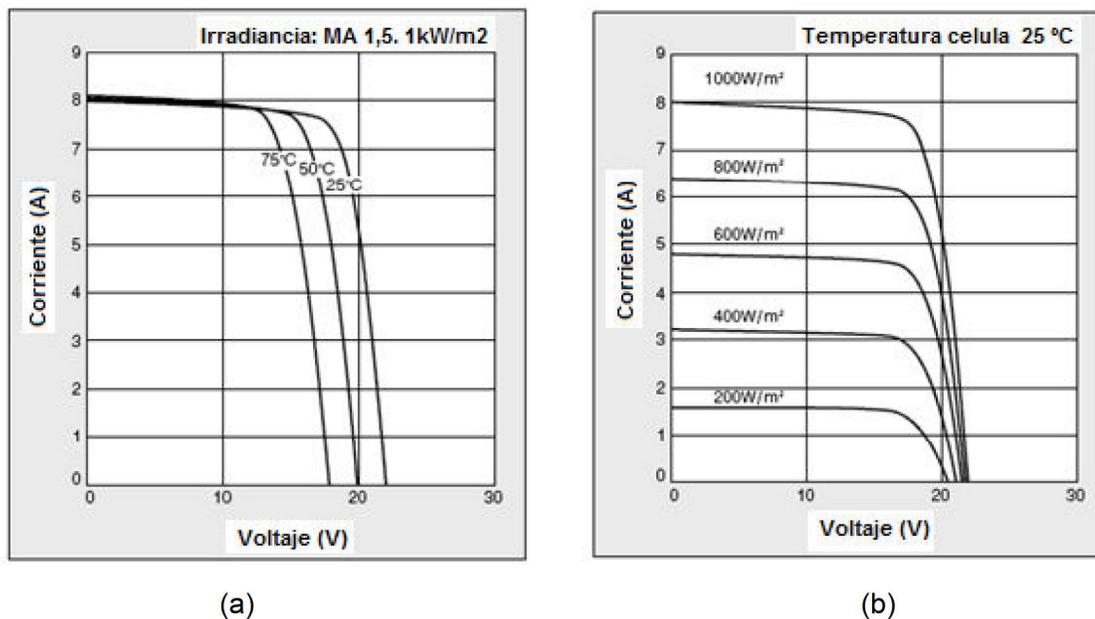


Figura 4. Curvas características $I=f(V)$ de un módulo solar comercial⁴

En la Figura 4 se muestra la curva $I = f(V)$ para distintos valores de temperatura y para distintos valores de irradiancia [15], (potencia de la radiación incidentes por unidad de superficie). Los parámetros de temperatura y radiación son los factores ambientales que más influyen en la potencia de salida de los módulos fotovoltaicos, siendo esto así, se puede observar que, para cada valor de temperatura y cada valor de irradiancia la

³ <http://amrita.vlab.co.in>

⁴ <http://www.wholesalesolar.com/products.folder/module-folder/kyocera/KC130TM.html>

corriente generada presenta un valor prácticamente constante hasta un determinado valor de voltaje, a partir del cual decrece rápidamente, hasta hacerse cero. Los cambios en la irradiancia afectan en mayor medida a la corriente, mientras que los cambios en la temperatura afectan al voltaje de salida.

También la potencia presenta un valor máximo para valores de voltaje muy próximos a los de circuito abierto (V_{oc}), siendo muy sensible a los cambios de radiación y temperatura. Cuanto mayor sea la radiación y menor la temperatura, mayor será la potencia generada.

2.1.3. Modelo eléctrico del módulo fotovoltaico.

Dado que los módulos fotovoltaicos están formados por varias celdas conectadas entre sí, las ecuaciones para la corriente y la potencia para un módulo fotovoltaico consideran los coeficientes n_p y n_s que representan el número de celdas en paralelo y serie respectivamente.

La curva de intensidad en función del voltaje ($I = f(V)$) y la curva de potencia en función del voltaje ($P = f'(V)$) tienen la misma forma que para los módulos fotovoltaicos, pero cambia la escala (el eje de voltaje ampliado en un factor n_s y los ejes de intensidad y potencia ampliados en un factor n_p) [15].

2.1.4. Características de los módulos fotovoltaicos

Las principales características técnicas de un módulo fotovoltaico son [15]:

- Corriente de cortocircuito (I_{SC}): Es la máxima intensidad de corriente que proporciona el módulo y corresponde a la corriente que entrega cuando se conectan directamente los dos bornes.
- Voltaje de circuito abierto (V_{OC}): Es el máximo voltaje que proporciona el módulo, correspondiente al caso en que los bornes estén en circuito abierto. V_{OC} suele ser menor de 21 V para módulo de voltaje nominal de 12 V.
- Voltaje nominal ($V_{nom_módulo}$): Es el voltaje para el que está diseñado el módulo (voltaje nominal del bus DC donde se conectará el módulo).
- Punto de máxima potencia: Existe un punto de funcionamiento (I_{max}, V_{max}) para el cual la potencia entregada es máxima $P_{max} = I_{max} \cdot V_{max}$. Ese es el punto de máxima potencia del módulo (medido en Watts pico, Wp) cuando el módulo trabaja en este punto se obtiene el rendimiento máximo. Los valores típicos de I_{max} y V_{max} son algo menores a los de I_{SC} y V_{OC} .
- Eficiencia (η): Es el cociente entre la máxima potencia que se puede obtener del módulo y la potencia de la irradiación incidente sobre su superficie.

Estas características del módulo están definidas para unas condiciones estándar que vienen determinadas por un nivel de irradiación de 1 kW/m^2 , temperatura interna del módulo de 25°C y distribución espectral de radiación incidente MA igual a 1,5 (Masa de aire), tal como se indica en la ecuación 2.

$$MA = 1/\text{sen}\gamma_s \quad (2)$$

De la ecuación dos el ángulo γ_s es la elevación del Sol en el sitio. La Masa de Aire con valor igual a uno corresponde a la radiación vertical sobre la superficie de la tierra. El funcionamiento eléctrico de un módulo fotovoltaico se representa mediante su curva característica $I = f(V)$ para condiciones estándar, que representa la corriente que proporciona en función del voltaje para dichas condiciones.

2.1.5. Constitución y funcionalidad del módulo fotovoltaico [15]

En las instalaciones fotovoltaicas suelen colocarse varios módulos fotovoltaicos en serie y/o paralelo, conjunto que suele denominarse generador fotovoltaico, o simplemente panel o módulo fotovoltaico. La conexión serie es necesaria para adecuar el módulo fotovoltaico al voltaje nominal del bus de corriente directa (DC) y el número de módulo en serie se calcula por la siguiente expresión:

$$N = \text{Voltaje}_{\text{bus_DC}} / \text{Voltaje}_{\text{nominal_módulo}} \quad (3)$$

Sin embargo la conexión en paralelo se utiliza para aumentar la potencia hasta el valor deseado.

Por lo tanto la curva $I = f(V)$ del conjunto de módulos fotovoltaicos tiene la misma forma que la de un solo módulo, pero aumentada en escala (el eje de voltaje aumentado en el factor del número de módulos en serie y el eje de intensidad aumentado en el factor del número de módulos en paralelo).

Tal como se ha mencionado anteriormente, la potencia de los módulos fotovoltaicos dependen la irradiancia y la temperatura de funcionamiento del módulo. Sin embargo, no se debe olvidar que la carga juega un papel fundamental, ya que el punto de operación viene determinado por el punto de corte entre la curva $I = f(V)$ del módulo fotovoltaico y la recta de la carga (representación de la intensidad frente al voltaje para el equivalente Thevenin visto por el módulo fotovoltaico).

2.2. ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE LA RADIACIÓN SOLAR

2.2.1. Generalidades Radiación Solar [11], [12], [13], [14], [15].

El sol produce una cantidad de energía constante que en el momento de incidir sobre la superficie terrestre pierde parte de su potencia debido a distintos fenómenos como difusión, absorción y reflexión.

La potencia radiante de 1367 W/m^2 que llega al Planeta Tierra no es la que finalmente alcanza la superficie terrestre debido a la influencia de los fenómenos atmosféricos, la actividad humana, la forma propia de la Tierra y el ciclo día/noche.

La atmósfera terrestre atenúa la radiación solar debido a los fenómenos de reflexión, absorción y difusión que los componentes atmosféricos (moléculas de aire, ozono, vapor de agua, CO₂, aerosoles, etc.) producen sobre ésta.

La difusión que se produce debida a la presencia de polvo y a la contaminación del aire depende, en gran medida, del lugar donde se mida, siendo mayor en los lugares industriales y en los lugares más poblados. Los efectos meteorológicos locales tales como nubosidad, lluvia o nieve afectan también a la irradiancia solar que llega a un determinado lugar.

Teniendo en cuenta todos estos parámetros, la irradiancia que incide en un plano horizontal de la superficie terrestre, un día claro al mediodía, alcanza un valor máximo de 1000 W/m² aproximadamente. Este valor depende del lugar y, sobre todo, de la nubosidad.

Si se suma toda la radiación global que incide sobre un lugar determinado en un periodo de tiempo definido (hora, día, mes, año) se obtiene la energía en kWh/m². Este valor es diferente según la región a la que hagamos referencia.

Para poder efectuar el diseño de una instalación solar fotovoltaica se necesita saber la radiación del lugar. Para ello se ha de disponer de las tablas de radiación solar actualizadas en el lugar, de las que los institutos de energía elaboran anualmente un atlas de radiación.⁵

Para el cálculo de la producción energética de una instalación solar es fundamental conocer la irradiación solar en el plano correspondiente a la instalación y la trayectoria solar en el lugar en las diferentes épocas del año.

De los conceptos que maneja el proyecto SIMEC [14] menciona la masa de aire (MA) como el cociente entre el recorrido óptico de un rayo solar y el correspondiente a la normal a la superficie terrestre (ángulo cenital cero) y está relacionada con la altura solar (α), ver Ecuación 2. Para $\alpha = 90^\circ$, MA = 1, que es el valor mínimo de MA y se corresponde con la situación del sol en el cenit (vertical del observador).

En la Figura 5 se tiene la altura solar y su correspondiente valor de MA, de acuerdo con la ecuación 2. En particular, para la Ciudad de Santiago de Cali, para el 16 de febrero del 2014, con coordenadas 3° 21' 13.546" N y 76° 31' 17.835" O, o dirección Carrera 115 # 25-1 a 25-99, Cali, Valle del Cauca, Colombia, a las 12 horas 20 minutos tiene la altura solar máxima⁶ $\alpha = 74,81^\circ$, por lo cual el valor correspondiente de MA = 1,084.

El valor de MA = 1 significa que el sol tiene la máxima altura o conocido como el sol en el cenit. La radiación solar en el espacio exterior, es decir sin atravesar la atmósfera terrestre, supone MA = 0.

⁵ <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7538/3/Anexo%20II%20-%20La%20energ%C3%ADa%20solar%20fotovoltaica.pdf>

⁶ http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es

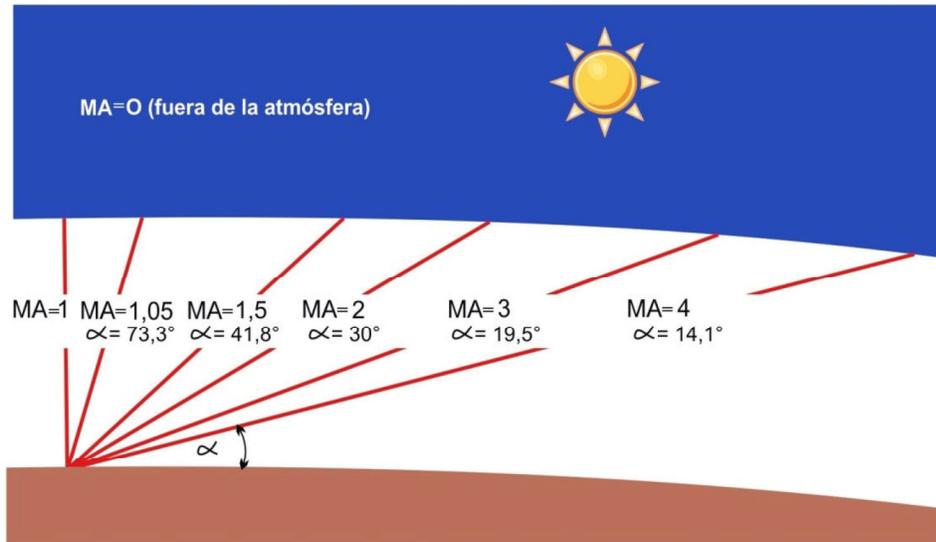


Figura 5. Masa del Aire determinada por posición relativa del sol respecto a la horizontal al sitio

La radiación solar en una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar es siempre mayor que en la misma superficie colocada en cualquier otra posición. Al variar el azimut y la altura solar a lo largo del día y del año, el ángulo de incidencia de radiación óptimo en una superficie dada no es constante. La situación óptima se daría en un plano cuya inclinación y orientación variara paulatinamente. No obstante, generalmente la superficie es fija.

En la literatura de energía solar fotovoltaica definen un concepto relacionado con la radiación solar de gran interés a la hora de calcular la producción de un sistema fotovoltaico; se trata de las "horas de sol pico" que pueden definirse como el número de horas al día con una irradiancia de 1.000 W/m^2 , que en conjunto suman la misma irradiancia total que la real de ese día.

El hecho de referir las horas de sol pico a una radiación de 1.000 W/m^2 es de gran interés, ya que la potencia de los módulos está asociada a una radiación de 1.000 W/m^2 por lo que si conocemos las horas de sol pico, la producción energética se calcula multiplicando la potencia del módulo por las horas de sol pico.

Si la irradiancia viene expresada en kWh/m^2 es un caso especialmente interesante, ya que las horas de sol pico, de acuerdo a la definición dada anteriormente, coinciden con el número en que viene expresada la irradiancia.

3. DISEÑO METODOLOGICO

El trabajo de grado desarrollado en la modalidad de pasantía contempló, en primera instancia, el enriquecer los conceptos sobre el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos y su importancia como fuente de energía alternativa; según lo cual, se elaboró las actividades de recopilación de la información, diseño, preparación e instalación de dispositivos, toma de datos, análisis e interpretación de la información y conclusiones. Ver Figura 6.

Los conceptos adquiridos mediante la recopilación de la información apoyada en la revisión de la literatura, tanto como artículos de investigación, libros y trabajos de grado, así como, la guía de los Directores, e inclusive el uso de los laboratorios y de las instalaciones de la Universidad Autónoma de Occidente Cali, que permitió comprender el funcionamiento de los módulos solares fotovoltaicos instalados en la Universidad.

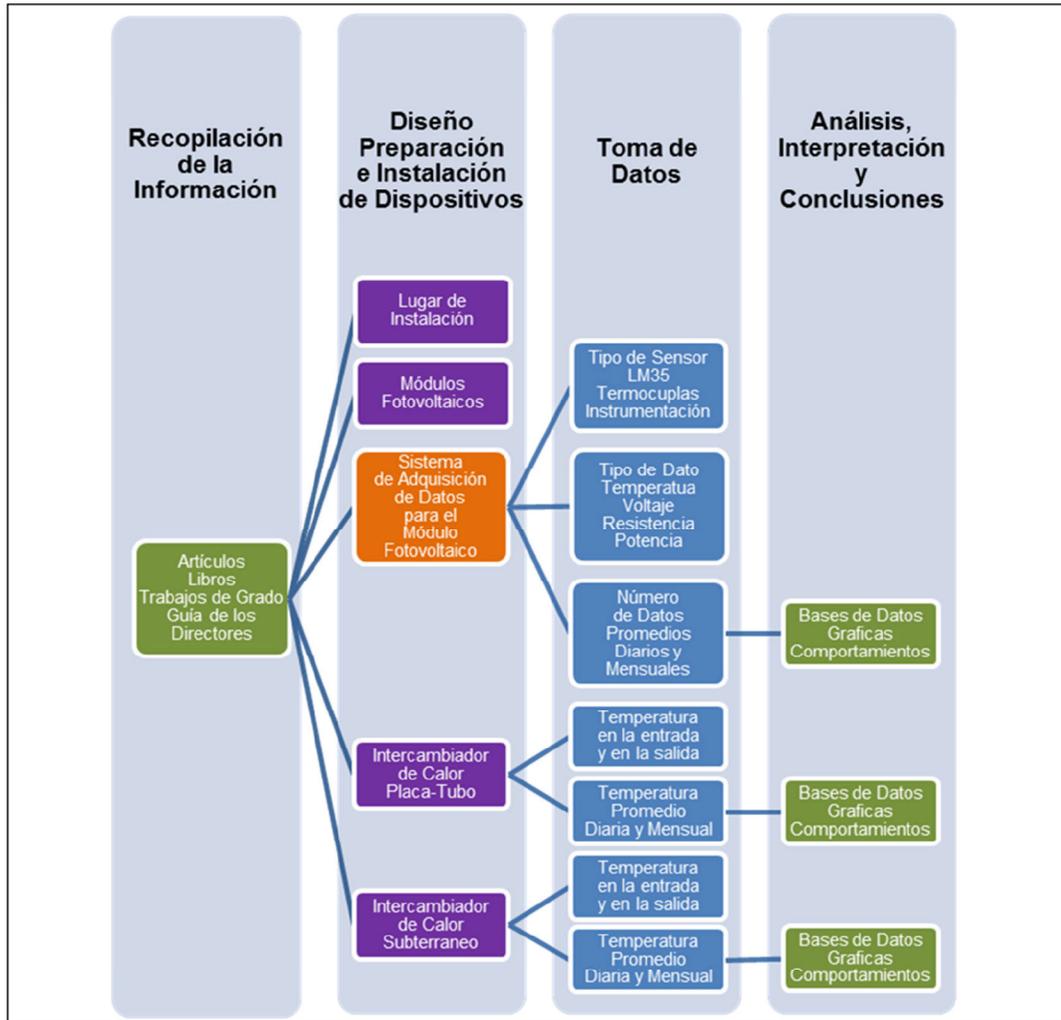


Figura 6. Diagrama de actividades

La temperatura del ambiente, del módulo y de los intercambiadores de calor, el voltaje, la corriente y la potencia generada por el módulo, y la potencia consumida por la bomba de agua son los datos deseados que se pueden recolectar, ya sea por costos o por el propósito de este trabajo; siendo así, se dio inicio a las diferentes actividades con participación pasiva o activa del diseño, preparación e instalación de los dispositivos con el fin de recolectar los datos.

Además en el diagrama de actividades de la Figura 6, se aprecia que los recuadros están de color Verde, Púrpura, Anaranjado y Azul, los cuales representan la contribución de mi participación en el grupo GIEN-UAO y en el desarrollo de este proyecto, es decir el recuadro de color Verde denota una participación Activa y de desempeño propio, el color Púrpura expresa una participación pasiva de observación, debido a la cooperación de otros integrantes del grupo GIEN, el color Anaranjado participación pasiva del diseño e implementación, pero si en aportes de conocimiento y experiencia en el área, y el color Azul representa una participación compartida con los integrantes del grupo GIEN.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO Y DE ENFRIAMIENTO FORZADO

El sistema fotovoltaico estuvo compuesto por dos módulos a los que se les denominó Módulo Fotovoltaico Sin Enfriamiento (MFSE) y Módulo Fotovoltaico Con Enfriamiento (MFCE). El MFSE es el dispositivo que suministro datos de referencia al estudio, mientras que el MFCE suministro los datos necesarios para evaluar el comportamiento del sistema de enfriamiento forzado.

El MFCE estuvo compuesto por dos intercambiadores de calor denominados Sistema Intercambiador de Calor 1 (SIC1) y Sistema Intercambiador de Calor 2 (SIC2). El SIC1 estuvo integrado por una placa base y una tubería en forma de serpentín ajustada a la parte trasera del módulo fotovoltaico, mientras que el SIC2 formado por un depósito con agua de un volumen de 1 m³, estuvo ubicado a 3 metros de profundidad del suelo. Los sistemas intercambiadores de calor se conectaron con una bomba centrífuga de agua mediante tubería; esta tubería se ensambló de tal forma que el flujo de agua transitó en circuito cerrado.

Para la extracción de calor excedente del módulo fotovoltaico MFCE primero, el agua fue impulsada por la bomba⁷ y viajó por los tubos del serpentín del SIC1 extrayendo el calor. Luego el caudal de agua caliente es transportado por tubería al SIC2 ubicado bajo tierra, en donde el SIC2 interactuó con el medio circundante como sumidero de calor.

El objetivo de usar el SIC2 bajo tierra es aprovechar la temperatura a la profundidad de 3 metros, la cual es inferior a la temperatura ambiente para la región de Cali, y también

⁷ El consumo energético de la bomba de agua es de 184 vatios y son suministrados por la red eléctrica; esto fue previsto para evitar carga al módulo fotovoltaico durante la etapa de estudio de este proyecto.

inferior a la temperatura del agua proveniente del módulo, generando así, un gradiente de temperatura de calor en dirección del SIC2 al ambiente del suelo.

Finalmente el agua fría salió del SIC2 en dirección a la bomba y al SIC1, esto es, haciendo circular el agua al sistema y cerrando el circuito, además de evitar la pérdida de agua. En forma esquemática el sistema fotovoltaico y de enfriamiento forzado se presenta en la Figura 7.

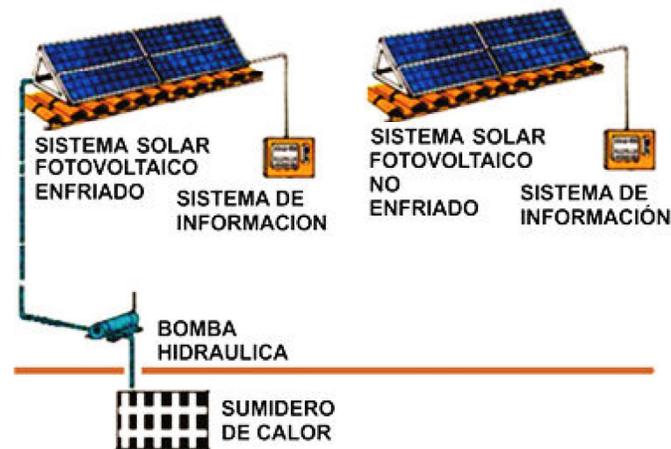


Figura 7. Esquema del sistema solar fotovoltaico con y sin enfriamiento

3.2. LUGAR DE LA INSTALACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Los dos módulos solares fotovoltaicos de 85W cada uno fueron instalados por parte de la Universidad en el techo del laboratorio de vapores, el cual linda con el parqueadero, con una zona verde y una planta de tratamiento. Mientras el cuarto técnico fue instalado a un costado del laboratorios de vapores. Ver Figura 8 y 9 del archivo GIEN-UAO.



Figura 8. Lugar de Instalación módulo solar fotovoltaico Universidad Autónoma de Occidente Cali



(a)

Figura 9. Cuarto técnico

3.3. ELECCIÓN DE MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTAICOS

De los diferentes módulos solares en el mercado, la Universidad Autónoma de Occidente compró los módulos solares marca HQRP⁸, por ser de bajo costo, el cual genera una potencia de 85W en condiciones de pruebas estándar (en inglés STC), es decir, con una masa de aire MA=1,5, una radiación solar constante de 1000W/m² y una temperatura del interior del módulo de 25°C⁹, y de características técnicas como las que se registran en la Tabla 1 y se ve en la Figura 10.

Tabla 1. Características del módulo Fotovoltaico HQRP de 85W

Característica	Información
tipo	monocristalino
medidas	1206x545x35 mm
Área dispuesta al sol	0,657 m ²
potencia nominal pico	85W
máximo voltaje pico	17,2V
voltaje de circuito abierto	21,6V
máxima corriente pico	4,95A
corriente de cortocircuito	5,37A
Condiciones de trabajo estándar	MA: 1,5; 1000W/m ² ; 25°C

⁸ <http://hqrp.com/other/solar-power/solar-panels/hqrp-85w-solar-panel-power-12v-monocrystalline-12v-pv-module-dc-battery-charger.html>

⁹ <http://www.amazon.com/HQRP-Monocrystalline-Controller-Regulator-Radiation/dp/B002WHQL2U>

MONOCRYSTALLINE SOLAR PANEL PV MODULE	
p-Blc-02s(10)	SBC85
Power	85W
Voc	21.6V
Isc	5.37A
Vmp	17.2V
Imp	4.95A
Max system voltage	600V
Size	1206*545*35mm
TEST CONDITION	AM1.5 1000W/m ² 25 °C
Made in China	

(a)



(b)



(c)

Figura 10. Módulo Solar Fotovoltaico HQRP de 85W. (a) Información técnica, (b) Frente del módulo y celdas fotovoltaicas, (c) atrás del módulo

3.4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL MÓDULO FOTOVOLTAICO

Para medir la temperatura de los módulos en función de la radiación solar en el día, en la parte posterior de cada módulo y a lo largo de la longitud de la línea media se instalaron, espaciados equidistantes uno del otro, tres sensores de temperatura LM35; de esta forma, el estudio de temperatura se realiza en tres zonas del módulo. Estos sensores son encapsulados electrónicos y funcionan entre otras características, en el rango de temperatura de -55°C a 150°C , con el factor de escala lineal de $+10.0\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Es decir, en cuanto al factor de escala, por cada incremento de la temperatura en un grado centígrado en la sección del módulo correspondiente, el sensor aumenta su valor en 10 mV.

Los sensores se conectan a la tarjeta electrónica recolectora de datos diseñada por el Grupo de Energías GIEN-UAO. Esta tarjeta consta de etapas de filtrado y amplificado de señal, además, en la programación de la tarjeta se resuelven los datos para adquirir el promedio aritmético de la temperatura, y se procesa el dato para enviarlo mediante protocolo RS232 al computador, es decir, datos de 8 bits de resolución, a velocidad de 1200 Baudios, sin paridad y con un bit de stop. El computador recibe los datos por el puerto serial COM1 mediante un algoritmo, y los almacena en un archivo texto.

Fue necesario usar dos tarjetas recolectoras de datos de iguales características para cada uno de los dos módulos en estudio. Acerca de las características del módulo con el MFCE y específicamente hablando del SIC1 se retomará en la página 31. Además, para proteger la tarjeta recolectora de datos de las variaciones de temperatura del módulo fue necesario instalarla en un montaje a 5 cm en la parte posterior del módulo, en otras palabras, cuatro tornillos largos permitieron suspender la tarjeta sobre las dos láminas de aluminio de 1cm de ancho, 5,54 cm de longitud y 5 mm de grosor, medidas ajustadas al ancho del módulo tal como se muestra en la Figura 11¹⁰.

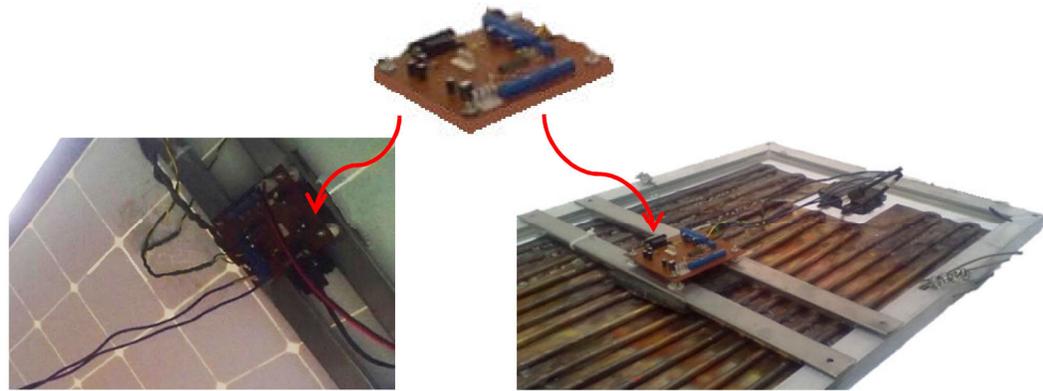


Figura 11. Tarjeta de Adquisición de Datos montada en: módulo normal y módulo con intercambiador de calor placa-tubo

Siendo la distancia desde los módulos al cuarto técnico, superior a 5 metros, la señal mediante el protocolo USB se ve perjudicada tanto en calidad y velocidad de los datos, en consecuencia se decidió usar el protocolo RS232 frente al protocolo USB.

3.5. ELABORACIÓN INTERCAMBIADOR DE CALOR PLACA-TUBO SIC1

El grupo de Energías GIEN-UAO, diseñó el intercambiador de calor placa-tubo de cobre [10], con las siguientes características: 14 tubos de cobre de diámetro de ½ pulgada (1,25 cm), de 115 cm de longitud en 8 tubos, y de 110 cm de longitud en 6 tubos, todos los tubos unidos en forma de serpentín y con espacio entre tubo y tubo de un valor de 2,3 cm, soldados a una placa de cobre de 115 cm x 51,4 cm x 3 mm.

La placa tubo va asegurada al armazón de aluminio diseñado para ajustarse al módulo solar. La placa tubo se instaló en la parte posterior de módulo fotovoltaico, configurando de esta forma el subsistema 1 de enfriamiento. La interacción de la placa tubo y el módulo permite la transferencia de calor del módulo a la placa-tubo, y de esta, al agua que fluye en el interior del tubo tal como se ve en la Figura 12¹⁰.

¹⁰ Archivo grupo de investigación en energías UAO



Figura 12. Instalación del intercambiador placa-tubo de cobre.

Con el objeto de aumentar el área de contacto entre la placa y la parte posterior del módulo, y, de la placa y el tubo, se adicionó silicona conductora, tal como se ve en la Figura 13¹¹.



Figura 13. Intercambiador de calor placa-tubo con silicona conductora

3.6. ELABORACIÓN INTERCAMBIADOR DE CALOR BAJO TIERRA SIC2

Con ayuda del grupo de Energías GIEN-UAO se diseñó un depósito en aluminio, de un metro cubico de almacenamiento de agua con válvulas de presión y purga de seguridad, y dos secciones de diámetro de una pulgada, que calzan con la tubería, en la parte superior para la entrada, y en la parte inferior para la salida de agua. Ver Figura 14¹¹.

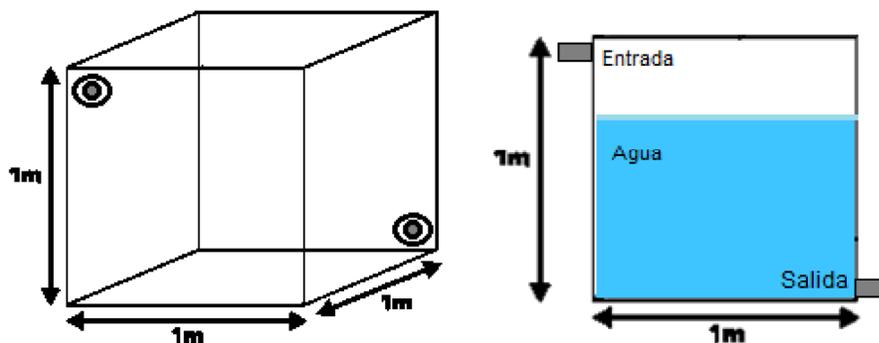


Figura 14. Esquema subsistema intercambiador de calor bajo tierra

¹¹ Archivo grupo de investigación en energías UAO

3.7. PROFUNDIDAD PARA INSTALAR EL INTERCAMBIADOR SIC2

Con la esperanza de alcanzar una temperatura promedio del subsuelo de 20°C, se hicieron perforaciones con taladro de golpe (5 perforaciones), y debido a las condiciones de material rocoso en el subsuelo no se superó la profundidad de 3 metros, sin embargo, se obtuvo una variación de temperatura de $\pm 3^\circ\text{C}$ alrededor de los 20°C, la cual está dentro del parámetro aceptables antes mencionado.

Por tanto se consideró, que la profundidad a instalar el SIC2 con estas condiciones técnicas es de tres metros.

3.8. BOMBA CENTRIFUGA DE AGUA

El flujo de agua que va del SIC2 en el subsuelo al SIC1 ubicado en el módulo fotovoltaico, es impulsado por una bomba centrífuga de 184 W a 110 Voltios de marca EVANS. La bomba de modelo 1HME025, cuenta con una salida estándar a tubería de una pulgada por una pulgada (1"x1"), ver Figura 15¹². El caudal óptimo de agua es de 70 litros por minuto, sin embargo, es ajustado con un variador de velocidad, a un valor constante de 2 m³/h, por 4 horas, es decir, un flujo de 250 litros por hora. Cálculos y consideraciones tomadas con ayuda del grupo de Energía GIEN-UAO.



Figura 15. Bomba Evans de ¼ HP (184 W)

El consumo energético de la bomba no es considerado en esta fase de estudio, ya que se prevé que, la adición de módulos fotovoltaicos en un estudio posterior va a suplir la necesidad energética de la bomba.

¹² <http://www.evans.com.co/2013/06/1hme025-motobomba-residencial-con-motor-0-25-hp-succion-y-descarga-de-1-pulgada>

3.9. INSTALACIÓN DE DISPOSITIVOS EN SITIO

Se instaló en el techo del Laboratorio de Vapores de la Universidad Autónoma de Occidente Cali dos módulos solares fotovoltaicos de 85 W cada uno; uno con un subsistema de enfriamiento placa-tubo, y el otro sin subsistema, ver Figura 16¹³.



Figura 16. Instalación módulo solar fotovoltaico en la Universidad Autónoma de Occidente Cali

La instalación del SIC2, o sistema intercambiador de calor bajo tierra, se realizó a una profundidad de 3 metros, tal como se aprecia en la región blanca numerada como 2, en la Figura 17¹³. Mientras que las regiones 1 y 3 que se aprecian en la Figura 17, hacen referencia a la tubería de ida y vuelta del agua refrigerante, la cual circula desde la parte posterior del módulo fotovoltaico al depósito en el subsuelo.

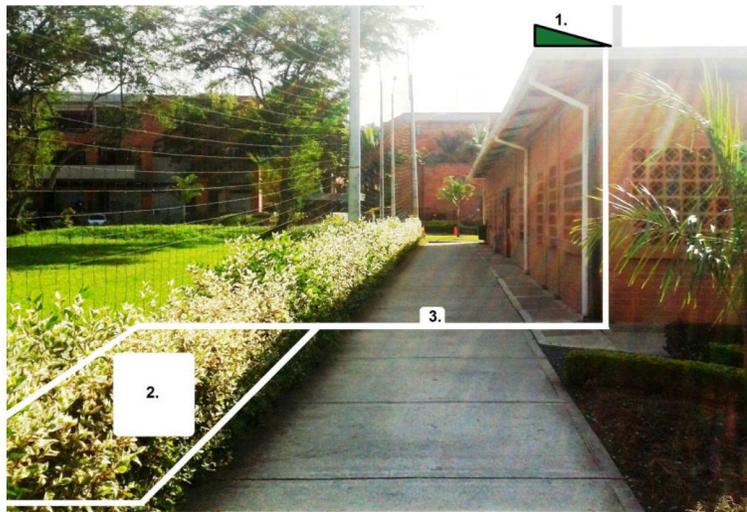


Figura 17. Lugar de excavación e instalación del subsistema intercambiador de calor subterráneo

¹³ Archivo grupo de investigación en energías UAO

3.8. RECOLECCIÓN DE DATOS

La recolección de los datos para el estudio, como medidas de temperatura del ambiente, del módulo, de los intercambiadores de entrada y salida, medidas de voltaje y potencia fueron recolectados en campañas prácticas junto con el grupo interdisciplinario de Energías GIEN-UAO de la Universidad Autónoma de Occidente. Por tanto en un primer examen de los datos se apreció los diversos cambios producidos de acuerdo a la temperatura ambiente, la radiación solar, el voltaje y la potencia del módulo solar. De la Figura 7 se puede ver el esquema de los dos módulos a los que se midieron los datos antes mencionados, y se almacenaron como base de datos en el sistema de información. Posteriormente, la información fue sometida a un programa matemático estadístico, cuyas características del programa son el facilitar el manejo de los datos y graficar el comportamiento de las variables.

El dispositivo Analizador solar-600 de marca AMPROBE®, es el dispositivo con el cual se midió las variables de voltaje, corriente y potencia, además, graficó el comportamiento de los módulos solares fotovoltaicos, ver la Figura 18 del Archivo grupo GIEN-UAO.

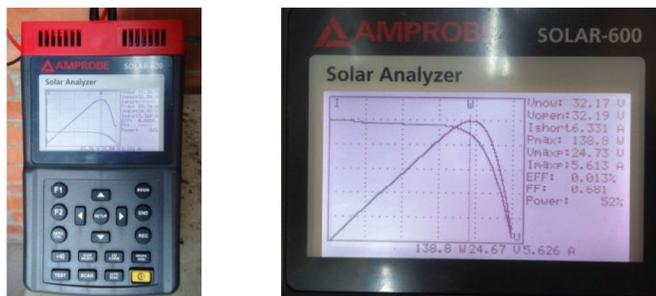


Figura 18. Analizador Solar-600

3.8. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Procesamiento, análisis e interpretación de la información para la realización del informe de la pasantía.

Los datos primarios se obtuvieron por medio de observaciones tanto personales como impersonales y sujetos a la naturaleza, finalidad y profundidad del trabajo, como también su originalidad y valor técnico, además de tener en cuenta los ajustes necesarios por la diversidad cambiante del ambiente, como presencia de nubes, lluvia, baja radiación, y otros particulares como, polvo, hojas, sombras (por árboles o construcciones), debido a falta de mantenimiento, que de alguna forma afectaron en los resultados obtenidos.

El manejo de los datos con el programa matemático, estadístico y gráfico, permitió plasmar la información mediante gráficas y así, analizar e interpretar, con mejor detalle la evolución de las diferentes variables. El informe de los algoritmos fue entregado al Laboratorio de Energías GIEN-UAO de la Universidad Autónoma de Occidente Cali; contribuyendo con el fortalecimiento del grupo, y como herramienta de trabajo, además facilite el análisis de posteriores estudios relacionados con sistemas fotovoltaicos.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describe el comportamiento del sistema fotovoltaico con y sin enfriamiento forzado, para obtener una respuesta particular a la problemática del calentamiento del módulo, y evaluar el uso de enfriamiento denominado intercambiador de calor SIC2.

Además, durante la pasantía en la Universidad Autónoma de Occidente Cali, fue expuesto el sistema de monitoreo al Docente Investigador del área de Energías Renovables; el estudio, que en su primera fase arroja resultados significativos y de gran aporte en esta temática de sistemas fotovoltaicos. También, se actuó como facilitador con los estudiantes de ingeniería, que cursan electivas en área de desarrollo sostenible y producción limpia, y de energías renovables en el uso de programas de análisis matemático y simulación.

Para la recolección de datos se usó como fuente primaria, la información de los módulos fotovoltaicos ubicados en la Universidad Autónoma de Occidente Cali, y como fuentes secundarias para el soporte teórico, los artículos, libros y trabajos de grado, y la orientación del Director de pasantía, lo cual permitió enfocar el trabajo de pasantía en el desarrollo de análisis e interpretación de los resultados por medio de la comparación de los sistemas fotovoltaicos con y sin refrigeración, influenciados por la temperatura y la radiación solar.

El trabajo interdisciplinario en el grupo de Energías GIEN-UAO de la Universidad Autónoma de Occidente Cali, integra diferentes estudiantes de ingeniería de pre y posgrado, técnicos y docentes, que permitieron compartir información de temas en relación al proyecto de energías alternativas, para unir y fortalecer dicha comunidad estudiantil, acorde con la misión de la Universidad Autónoma de Occidente, “formación de personas con visión humanística, creativa y emprendedora en la generación de conocimiento, y en la solución de problemas en el entorno regional y nacional”¹⁴.

4.1. RADIACIÓN SOLAR EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CALI COLOMBIA

La incidencia de radiación solar en la ciudad de Cali depende de diferentes factores, entre ellos los meteorológicos; estos son muy cambiantes durante el año, y cualquier dispositivo que funcione con radiación solar se ve afectado.

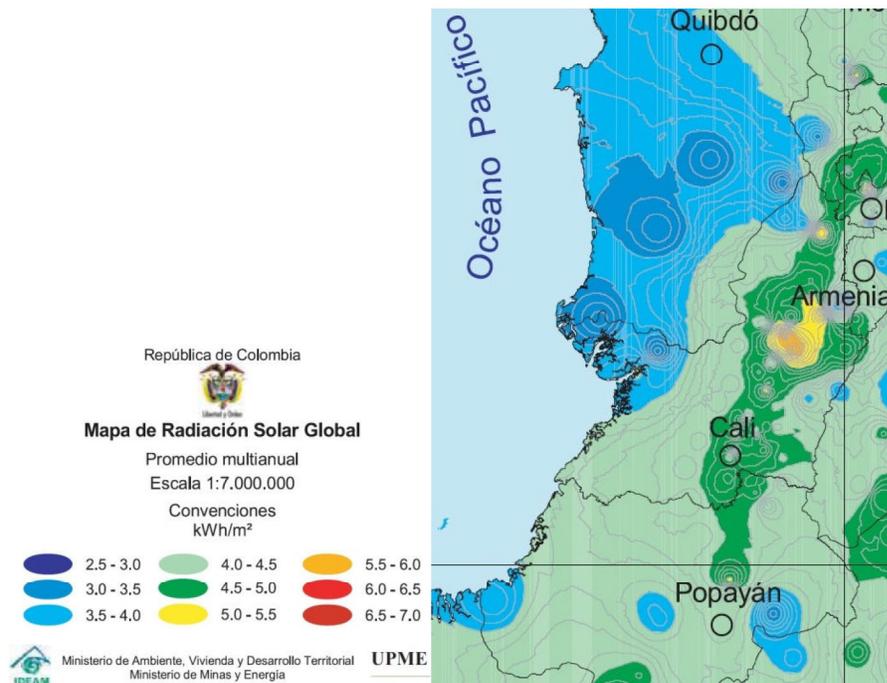
Por tanto, para conocer los diferentes niveles de radiación que influyen en la ciudad de Cali, fue necesario acercarse al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de la Universidad del Valle Cali, para solicitar un valor promedio día de la radiación, y en esa información se encontró que este valor promedio es de 4,95 kWh/m² por día. Este dato es adecuado con respecto a la información de los Mapas

¹⁴ <http://www.uao.edu.co/la-universidad/mision>

de Radiación Solar Global Sobre Una Superficie Plana¹⁵, ya que muestra que la incidencia de la radiación en esta ciudad varía de 4,5 a 5.0 kWh/m²/día [16], tal como se puede ver en la Figura 19^{16, 17}.

Los cambios en la radiación solar incidente en la Ciudad de Cali se ven afectados por la rotación de la tierra, lo cual genera una curva de radiación en la evolución del día, y además, se destaca la Hora Solar Pico (HSP), la cual comprende un rango de horas de sol donde se concentra la mayor parte de la radiación solar [14].

En las figuras que se presentaran más adelante (Figuras 20 y 21) se puede ver, como la radiación solar a condiciones meteorológicas con poca presencia de nubes influye en el módulo fotovoltaico, y se percibe en forma indirecta la región del día en donde se produce la Hora Solar Pico (HSP).



**Figura 19. Radiación Promedio Multianual. (kWh/m²)
Del Departamento del Valle - Colombia**

¹⁵ Propiedad IDEAM y UPME:

<http://www.si3ea.gov.co/si3ea/Home/EnergiaSolar/tabid/74/language/en-US/Default.aspx>

¹⁶ Atlas de Radiación Solar de Colombia .Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME

¹⁷ Estudio y Puesta en Marcha de un Sistema de Generación Fotovoltaica. Trabajo de Grado Universidad de Los Andes. Autor: Br. Margeris del V. Jiménez S.2008

4.2. DATOS TOMADOS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN ESTUDIO

Se fijaron criterios operativos que influenciaron directamente en el desarrollo del estudio. Algunos de ellos era programar visitas al sistema fotovoltaico a determinadas horas (entre las 10 am y 6 pm) en determinados días (Lunes a Viernes), esperando que la radiación y el clima sean óptimos desde el punto de vista de tener una radiación constante e incidente en la superficie del módulo.

4.2.1. Datos del Módulo Fotovoltaico Sin Enfriamiento MFSE

El registro de datos para el periodo de 11:30 am a 7:30 pm corresponde al día 20 de septiembre, el cual fue un día soleado con temperatura promedio del ambiente de 33,9°C, con una temperatura promedio del módulo de 37,8°C y una potencia promedio producida de 24,7W/h, datos significativos del funcionamiento del MFSE. Los datos se encuentran en el Anexo A.

El comportamiento de las variables de temperatura, voltaje y potencia en función del tiempo del Anexo A se muestra en la Figura 20. Esta figura muestra el eje del tiempo en horas, sin embargo, se puede usar el horario am y pm de un día sin ningún problema.

En La Figura 20 se observa de forma indirecta una región de Hora Solar Pico entre las 12 del mediodía y las 4 de la tarde (hora 16), esto es porque la temperatura ambiente es una medida que se relaciona con el calor del ambiente debido a la radiación solar y esta franja de 4 horas da una idea de horas de luz solar efectivas por día. Tal como en la literatura se menciona.

En la Figura 20, se puede ver el comportamiento relacionado de todas las variables en un periodo de tiempo entre las 11:30 am y las 7:30 pm (hora 11,50 y la hora 19,50 respectivamente), debido a la influencia de la radiación solar sobre la superficie del módulo fotovoltaico, por lo cual si la radiación solar aumenta o disminuye se ve reflejado en las diferentes variables como temperatura ambiente y temperatura del módulo, además del voltaje y la potencia que entrega el sistema, es decir la radiación solar influye directamente sobre las variables del sistema.

Se debe tener en cuenta que hay una pérdida en la potencia generada por el aumento en la temperatura y el valor típico del fabricante que le asigna a las pérdidas de potencia por cada grado centígrado que aumenta la temperatura por encima de 25°C (STC) es 0,005/°C. Es decir a mayor temperatura menor potencia.

Con respecto a la Figura 20, a partir de las 6 de la tarde (hora 18), se observa como las curvas de voltaje y potencia tienden a cero debido a la disminución de la radiación solar causada por el ocaso del sol.

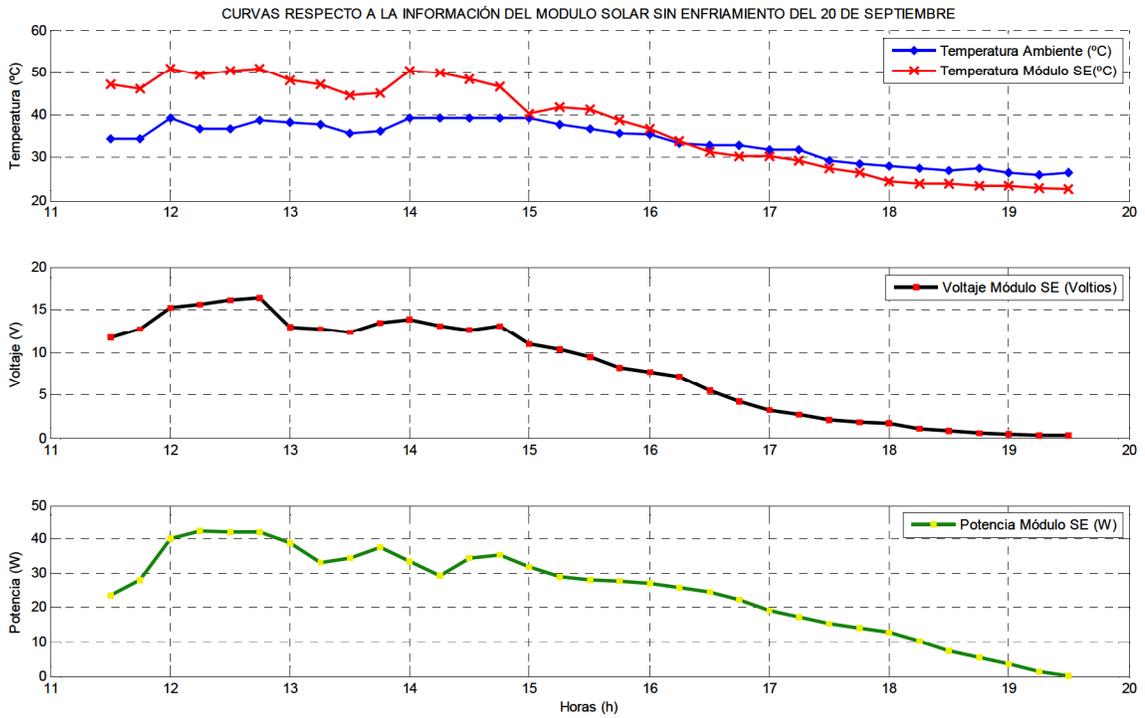


Figura 20. Comportamiento del módulo solar sin enfriamiento

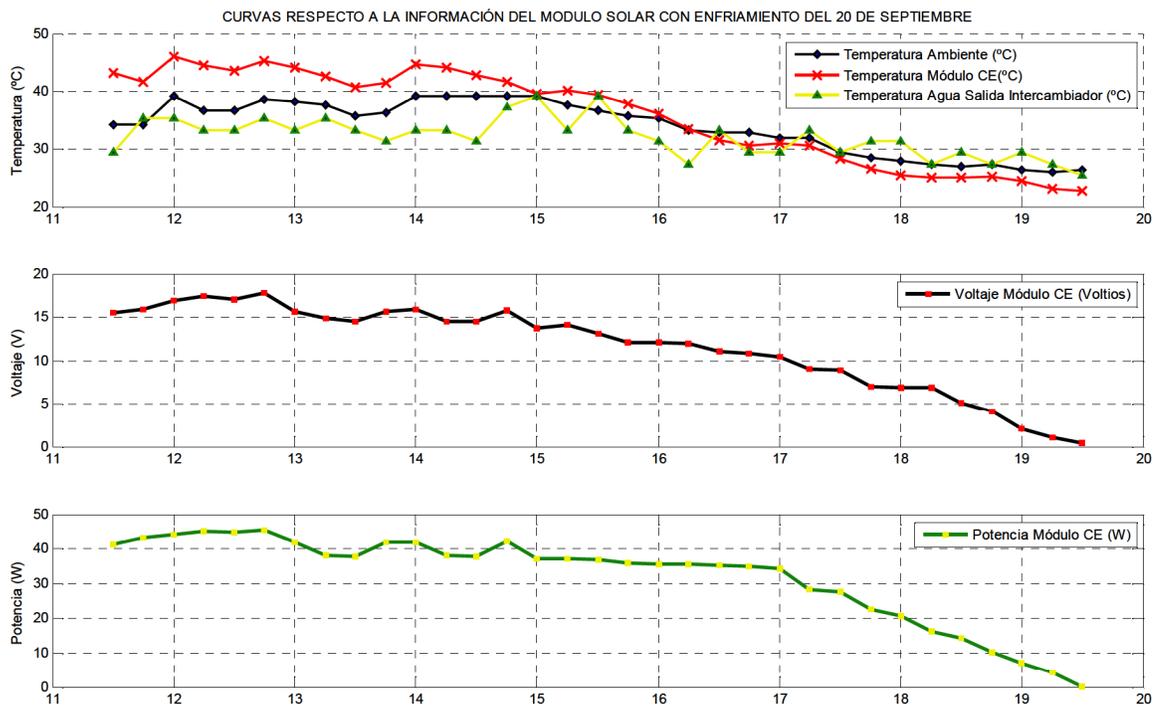


Figura 21. Comportamiento del módulo solar con enfriamiento

4.3.2. Datos del Módulo Fotovoltaico Con Enfriamiento MFCE

4.3.2.1. Datos en el Periodo de 11:30 am a 7:30 pm.

El registro de datos para el periodo de 11:30 am a 7:30 pm corresponde al día 20 de septiembre, el cual fue un día soleado con temperatura promedio del ambiente de 33,9°C, con una temperatura promedio del módulo de 35,9°C y una potencia promedio producida por el módulo de 32,1W/h, datos significativos del funcionamiento del MFCE, es decir, para este estudio se hizo circular agua por el SIC1 Y 2, con el fin de enfriar el módulo [13], [14], [15].

El agua sale del intercambiador placa-tubo y es llevada por tubería al sumidero de calor ubicado a 3 metros del suelo, permitiendo así, que el agua-caliente procedente del intercambiador placa-tubo se enfríe en el sumidero, el cual es un intercambiador de calor con el ambiente del suelo [16], [17]. Luego el agua-fría que sale del SIC2 se retorna al sistema, por tubería hacia la entrada del SIC1 en el módulo fotovoltaico. Para hacer circular el agua por todo el sistema se hizo uso de una bomba centrífuga de 184W con salida de 1" x 1" NPT¹⁸, 110 v. de marca Evans. Los datos se registran en el Anexo B.

De la información de la Figura 21, el agua que sale del intercambiador de calor en la parte posterior del módulo, sale con una temperatura superior a los 30°C en la mayor parte del día hasta las 4 pm. Además se puede observar que la temperatura del módulo fotovoltaico y la del ambiente, están por encima de la temperatura del agua saliente del intercambiador placa-base hasta las 5 de la tarde (hora 17). Después de las 5 de la tarde el agua baja gradualmente su temperatura debido a que aún sigue refrigerando el módulo a pesar de que este no presenta un calentamiento excesivo.

El agua que ingresa en el intercambiador SIC1 registró la temperatura de 20°C, con respecto a la temperatura que ingresa al intercambiador SIC2 la cual es superior a 30°C, por tanto se puede decir que, el SIC2 cumple con la función de disminuir la temperatura del agua haciendo fluir el calor excedente hacia el entorno de la tierra a 3 metros bajo el suelo.

Con respecto a las curvas de voltaje y potencia registradas en la Figura 21, se muestra la influencia directa del clima sobre el módulo fotovoltaico, por cuanto este día en particular se observó una mañana soleada y presencia de nubes en la tarde.

En la Figura 22 se compara la temperatura ambiente, módulo sin y con enfriamiento lo que nos indica que la temperatura sin y con enfriamiento se sitúa por encima de la temperatura ambiente en el periodo de 11 am a 4 pm (hora 11 a hora 16 respectivamente). La temperatura del sistema con enfriamiento tiene un comportamiento si se puede decir, casi en forma paralela y por encima de la temperatura ambiente hasta las 4 de la tarde. Posterior a las 4 de la tarde las temperaturas de los sistemas se ubican por debajo de la temperatura ambiente, esto es debido a la presencia de nubosidad.

¹⁸ NTP: Rosca nacional o americana cónica para tubos, la cual es una norma técnica de los elementos de conexión en los sistemas e instalaciones hidráulicas.

Hasta las 4 de la tarde (hora 16) se puede observar que la temperatura del sistema fotovoltaico sin enfriamiento está por encima de la temperatura ambiente y de la temperatura del sistema fotovoltaico con enfriamiento.

Se puede observar que en todo momento del día el sistema fotovoltaico con enfriamiento presenta mayor potencia que el sistema fotovoltaico sin enfriamiento, a pesar de las características climáticas del día.

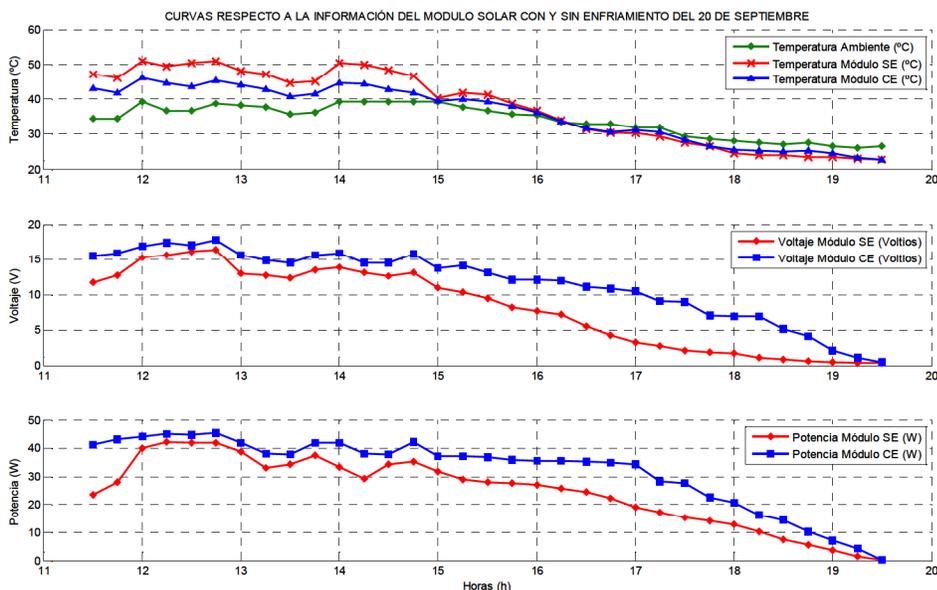


Figura 22. Comportamiento del módulo solar sin y con enfriamiento

4.3.2.2. **Valores Promedios de las variables obtenidos a las 11:00 am con y sin el Sistema de enfriamiento en días diferentes en el periodo Septiembre - Diciembre:**

Se efectuó el promedió de los datos, de medidas de temperatura ambiente y del módulo, y de la potencia, en diferentes días, de los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre a las 11am, los datos se registran en la Tabla 2 y se representan en la Figura 23.

Se realiza el promedio de los datos desde septiembre a diciembre para los módulos fotovoltaicos con y sin enfriamiento de la Tabla 2, se obtiene un valor promedio de 30,551°C de temperatura ambiente, un valor promedio de 36,081°C para la temperatura del módulo, y un valor promedio de 31,363W para la potencia sin el sistema de enfriamiento, y un valor promedio de 41,069W para la potencia con el sistema de enfriamiento, lo cual indica que, el valor promedio de la temperatura ambiente es menor que la temperatura del módulo, se confirma que el módulo se calienta con respecto al valor promedio tomado en las fechas de estudio, además, debido al calentamiento del módulo se obtiene una potencia baja respecto a las condiciones de trabajo estándar para

el módulo solar de 85W, el cual, especifica que para una temperatura de 25°C se obtiene una potencia de 85W, por lo cual se puede decir que a mayor temperatura en el módulo, menor es la potencia generada. Se observa que se obtiene una potencia promedio de 41,069W en el sistema con enfriamiento y es más alta en comparación a los 31,363W (potencia promedio) en el sistema sin enfriamiento.

En la Figura 23, el eje horizontal muestra las fechas en las que se realizó la toma de datos, y el eje vertical se lee dependiendo de qué curva se observa; se presentan dos curvas, una concerniente a la temperatura y se lee en Centígrados (°C) y otra, a la potencia y se lee en vatios (W).

En la Figura 23 las curvas de temperatura y potencia del módulo se superponen para observar el comportamiento y su relación en el tiempo de acuerdo con los valores promedios de 36,081°C para la temperatura del módulo, de 31,363W para la potencia sin el sistema de enfriamiento, y un valor promedio de 41,069W para la potencia con el sistema de enfriamiento, de modo que el 04, 13, 21 y el 30 de septiembre, 15 de Noviembre y 5 de diciembre presenta una temperatura alta y una potencia baja con respecto a los promedios, mientras que para el 20 de septiembre, 01 de octubre, 21 y 25 de noviembre y 07 de diciembre presenta una temperatura baja y una potencia alta con respecto a los promedios.

Estos datos promedio permitieron observar un comportamiento inverso entre las variables de temperatura y potencia, por lo tanto, cuando la temperatura aumenta la potencia disminuye, y, cuando la temperatura disminuye la potencia aumenta. No obstante, los casos en los que la potencia de los módulos muestran valores bajos se pueden presentar por distintos factores afectando el buen desempeño del módulo fotovoltaico; los factores más comunes que afectan el funcionamiento son los factores ambientales, sin embargo, también hay factores como el sobre calentamiento y/o la presencia de sombras en ciertas celdas, así, el módulo puede estar sometido a la sombra de infraestructuras aledañas y en consecuencia, el módulo al no recibir radiación de forma uniforme sobre toda la superficie causa efectos negativos en la producción de potencia, dicho de otro modo, la sombra sobre ciertas celdas causa un mal desempeño de las mismas, y la exposición por varias horas puede generalizar una reacción de efectos nocivos sobre el módulo, y así, converger globalmente en un mal funcionamiento del módulo completo. Finalmente algunas celdas fotovoltaicas se desgastan al compensar la pérdida, y de esta forma se disminuye la vida útil de la celda y del módulo.

El promedio de la temperatura del módulo y la potencia en un día a las 11 am por las condiciones meteorológicas en el sistema fotovoltaico con y sin enfriamiento son diferentes de un día a otro causado por la diferencia en la radiación solar incidente en la superficie del módulo fotovoltaico, teniendo en cuenta que la radiación solar promedio multianual en Cali registrada por el UPME, es de 4,5 a 5 kw/m² [12], se considera que la radiación incidente en el módulo, se ve afectada por condiciones meteorológicas particulares cercanas a la Universidad Autónoma de Occidente Cali, por ejemplo presencia de nubes y lluvia.

La toma de datos tal como se muestra en la Figura 23 nos indica que existen muchas variaciones entre la temperatura y la potencia, esto debido entre otras cosas, a los datos que se toman en diferentes días. La variación de la temperatura en la ciudad de Cali esta

entre los 24 y los 35 grados centígrados en horas solar pico, y, dependiendo del clima hay días en los que se presenta mayor temperatura que otros, además la presencia de nubes, lluvias, basuras y sombras afectan el rendimiento del módulo fotovoltaico.

Tabla 2. Promedio de la temperatura y la potencia de los módulos fotovoltaicos con y sin enfriamiento

Fecha	Temperatura. Ambiente [°C]	Temperatura. Módulo [°C]	Potencia Modulo Sin Enfriamiento [W]	Potencia Modulo Con Enfriamiento [W]
04 Sep.	33,313	38,518	26,345	30,263
13 Sep.	32,805	42,454	6,007	15,445
20 Sep.	27,473	29,045	53,765	60,055
21 Sep.	33,692	41,028	15,850	17,721
30 Sep.	32,756	37,834	32,292	37,525
01 Oct.	29,547	30,289	46,085	56,911
15 Nov.	31,916	38,473	15,715	36,794
21 Nov.	24,647	26,709	63,557	78,102
25 Nov.	30,549	35,042	36,090	49,292
05 Dic.	31,387	43,108	5,723	13,100
07 Dic.	27,972	34,388	43,560	56,549

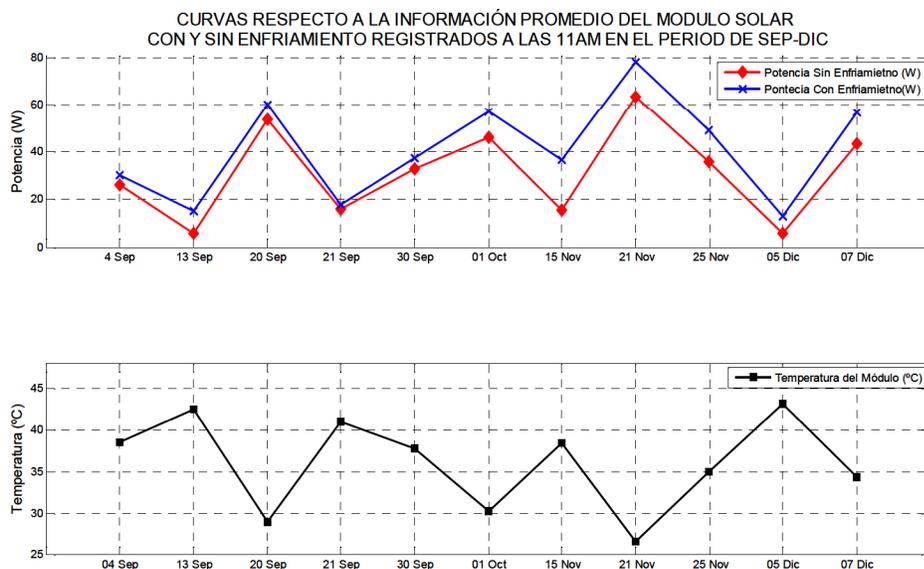


Figura 23. Comportamiento promedio de la temperatura y potencia producida con enfriamiento

4.2.3. Análisis del Sistema Sin Enfriamiento Vs el Sistema Con Enfriamiento.

De los datos registrados de la Tabla 2 se realizó la comparación de la información correspondiente a la Temperatura y Potencia, de tal modo que el resultado de los módulos con y sin enfriamiento en labor a las 11 am durante diferentes días, de diferentes meses se observa en la Figura 24.

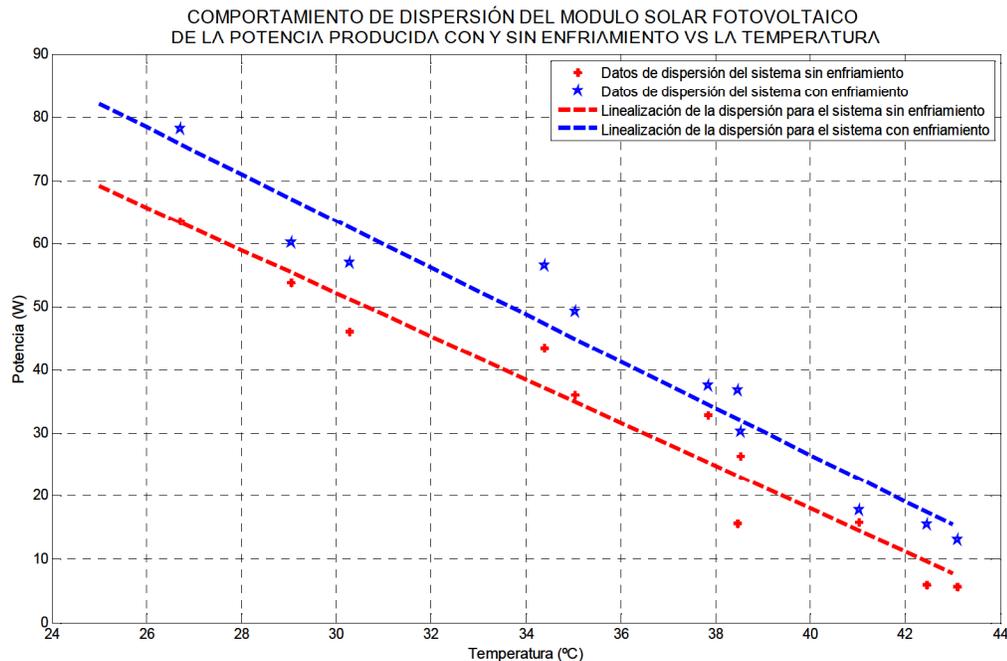


Figura 24. Comparación de Curvas de dispersión de la potencia producida con un sistema sin enfriamiento y otro con enfriamiento

La forma como se disponen los datos de potencia versus temperatura en la Figura 24, muestran gráficamente un incremento de potencia cuando se trabaja con el sistema de enfriamiento, para tal efecto se debe tener en cuenta que, el comportamiento de los sistemas con y sin enfriamiento tal como lo muestra la Figura 24, son particulares a las condiciones del momento, por cuanto los datos representan valores promedio de las variables en diferentes días, funcionando a las 11am, y los valores de potencia están sujetos a las variaciones de radiación solar específicos del día como a los demás aspectos meteorológicos. El sistema con enfriamiento presenta una mejor expectativa en su funcionamiento que el sistema sin enfriamiento. Por lo cual el resultado de la producción de potencia promedio es mayor en un sistema de módulo fotovoltaico con enfriamiento que uno sin enfriamiento.

El módulo fotovoltaico con enfriamiento funciona mejor que el módulo sin enfriamiento, ya que el sistema SIC1 y 2 es operativamente adecuado para extraer el calor excedente en un módulo solar fotovoltaico.

Con la información que proporciona la figura 24, y dada la temperatura de funcionamiento del módulo solar de 34°C, se puede calcular el rendimiento del módulo solar con enfriamiento (MFCE) con respecto al módulo sin enfriamiento (MFSE) a la misma temperatura de operación, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = 100 - \frac{(\text{Potencia MFSE})}{(\text{Potencia MFCE})} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Rendimiento} = 100 - \frac{(39)}{(49)} \times 100 \sim 20,41\%.$$

Por tanto, se obtiene con el sistema de enfriamiento propuesto en este trabajo, hasta un 20% de mayor rendimiento energético que en un módulo solar sin los sistemas de intercambiadores.

También se obtiene como resultado que el incremento de temperatura en el módulo fotovoltaico produce una reducción en la potencia generada por el mismo, sin embargo si la temperatura del módulo disminuye y es cercana a 25°C, la potencia generada por el módulo solar aumenta.

4.2.4. Deducciones del funcionamiento de un Sistema de Enfriamiento Forzado con la carga eléctrica de la bomba centrífuga.

Al principio de este proyecto no se tuvo en cuenta el consumo eléctrico de la bomba centrífuga de agua, ya que un módulo fotovoltaico de 85 vatios no puede suplir la necesidad del consumo de 184 vatios de la bomba, además se debe tener en cuenta la eficiencia del inversor DC/AC, por consiguiente para este caso se escoge un inversor con eficiencia del 90%¹⁹ en la entrega de potencia de salida, por tanto, y a partir del beneficio que trae refrigerar los módulos según la información de las figuras 22, 23 y 24, a continuación se calcula el número mínimo de módulos que solucionan dicho consumo.

Por consiguiente si se necesitan refrigerar diez módulos solares con el sistema de enfriamiento forzado propuesto en este trabajo, son necesarios mínimo tres módulos solares de 85W que alimenten la bomba centrífuga de agua de 184W, y teniendo en cuenta la eficiencia del inversor DC/AC igual al 90% entonces los tres módulos fotovoltaicos generan 229,5 vatios. Por consiguiente el agua será enviada desde un depósito a 3 metros bajo tierra, al techo de un hogar de tres pisos (de 10 a 13 metros de alto). Ciertamente según la tabla de información de funcionamiento de la bomba usada en este estudio, la bomba de ¼ HP (184W), tiene la capacidad dinámica de bombear 30 litros por minuto, a una altura máxima de 13 metros, de modo que, la capacidad de la bomba es suficiente para refrigerar los 10 módulos a dicha altura.

¹⁹ http://proyectodeenergiasrenovable.com/Descargas/Manuales/Curso_Interconexcion_a_red/Inversores.pdf

Este estudio permitió ver la capacidad de los módulos fotovoltaicos para sostener la carga eléctrica en funcionamiento de la bomba centrífuga de agua, es decir, el funcionamiento de las bombas cuando el sol esta entre las 11 am y las 3 pm.

4.2.5. Cálculos del funcionamiento de un Sistema de Enfriamiento Forzado en una vivienda familiar.

En el supuesto de instalar los módulos fotovoltaicos con el sistema de enfriamiento propuesto en este trabajo en una vivienda familiar, necesitamos tener en cuenta varios aspectos, entre los cuales consideraremos solo los siguientes:

- Número de personas,
- Estrato socio-económico,
- Costo monetario por cada kilovatio hora,
- Consumo energético promedio de la vivienda familiar
- Temperatura máxima media anual de la Ciudad de Cali,
- Margen mínimo del 10% extra de energía para prevenir un consumo energético más alto que el promedio
- Por cada 10 módulos aumentar el consumo de 184 vatios de cada bomba.
- La Vivienda familiar no tiene una altura superior a los 10 metros,
- Se supone que la instalación del sistema fotovoltaico debe contar con un sistema de baterías que almacenarán la energía producida por los módulos, además de otros dispositivos necesarios para la distribución de la misma y las pérdidas de potencia debido a estos aspectos es nula.
- La eficiencia del inversor DC/AC es del 90%.

Por lo tanto, observemos una vivienda familiar de estrato socio-económico 4 en la ciudad de Cali, habitada por 3 personas y además consumen en conjunto y mensualmente en promedio 228,5KW a un precio de 481,94 pesos/KWh (total = 110.123,29 pesos), se puede encontrar un número adecuado de módulos solares con sistema de enfriamiento propuesto en este trabajo y teniendo en cuenta que los módulos trabajan al 85% de su capacidad y a una temperatura máxima media anual aproximada de 30°C²⁰ de la ciudad de Cali, entonces:

Funcionamiento del módulo solar

$$85W \times 85\% = 72,25W \quad (5)$$

Por tanto, para este ejemplo el módulo tendrá un rendimiento de 72,25 vatios.

²⁰ Promedio Climatológico en el periodo comprendido entre los años 1981 y 2010, archivo en Excel consultado el 22-08-2014 en la página web institucional del IDEAM, disponible en línea: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Publicaciones&lTipo=publicaciones&lFuncion=loadContenidoPublicacion&id=812>

El número de módulos (N) se calcula teniendo en cuenta el consumo energético mensual, las 4 horas solar pico, los 30 días de consumo, y la eficiencia del 90% del Inversor como se muestra a continuación.

Consumo energético mensual = N módulos x 72,25W x 4 horas solar pico x 30 días x 0,9. (6)

$$228,5KW = N \times 72,25W \times 4 \times 30 \times 0,9$$

Despejando N, tenemos que el número mínimo de módulos es de 29, pero lo aproximaremos a 30 por efectos prácticos, sin embargo falta agregar el consumo de las bombas, ya que por cada 10 módulos solares se necesita una bomba de 184 vatios, de modo que bajo los resultados de este trabajo se logró establecer que se necesitan mínimo tres módulos solares por cada bomba, entonces necesitamos un total de 39 módulos solares.

Los 39 módulos solares de 85 vatios funcionando al 85% (72,25 vatios) en las 4 horas solar pico, durante 30 días y considerando la eficiencia del inversor del 90% la potencia producida da un total de 304,317 KW y considerando que este valor energético supera el 10% mínimo de energía requerido para solventar cualquier eventualidad de gasto energético superior al promedio, se puede decir que el sistema completo puede suplir las necesidades de consumo energético de la familia de 3 personas en estrato 4, que consume mensualmente 228,5 KW a un precio de 481,94 pesos/KWh (total = 110.123,29 pesos), además según la Tabla 1 de las características del módulo solar tenemos que 39 módulos solares son aproximadamente 26 metros cuadrados de área dispuesta al sol, área perfectamente razonable en un techo de una vivienda familiar.

Este trabajo de grado en modalidad de pasantía se encargó de hacer un estudio del comportamiento de algunas de las variables que inciden en proceso de generación eléctrica a partir de un módulo solar fotovoltaico, y el resultado de este estudio arrojó que bajo condiciones de radiación solar de $1kW/m^2$, temperatura ambiente máxima media anual de $30^{\circ}C$ el módulo fotovoltaico con sistema de enfriamiento forzado haciendo uso de los intercambiadores de calor 1 y 2 es operativamente más viable por la obtención de mayor potencia, en contraste con el módulo solar sin ningún sistema de enfriamiento.

Finalmente este estudio va a permitir que trabajos futuros tengan en cuenta estos resultados, y quizá en un futuro ponerlo en práctica a nivel de una población rural pequeña.

CONCLUSIONES

- ❖ El objetivo fundamental de este proyecto de pasantía fue el de evaluar la potencia producida en el comportamiento de un módulo solar fotovoltaico con enfriamiento forzado acompañado de un subsistema de intercambiador de calor bajo tierra. El resultado es satisfactorio en el sentido en que los sistemas son operativamente funcionales.
- ❖ Se verificó que el suelo a la profundidad de 3 metros se encuentra a una temperatura promedio de 20°C e inferior a la temperatura del ambiente de la ciudad de Cali la cual oscila por los cambios del clima entre 25 y 37°C de 11 am a 5 pm, por tanto la profundidad de 3 metros fue buena para colocar el intercambiador de calor que ayudó a extraer el calor del módulo solar.
- ❖ Las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento del módulo solar fotovoltaico con sistema de enfriamiento compuesto por un intercambiador placa-tubo y un intercambiador de calor enterrado bajo tierra, fueron adecuadas y aseguraron un buen desempeño al obtener una mejor producción de potencia promedio. Dicho de otro modo, se verificó que el intercambiador de calor enterrado bajo tierra cumple su función de reducir la temperatura del agua a 20°C en promedio, con respecto a la temperatura del agua proveniente del intercambiador de calor placa-tubo del módulo solar fotovoltaico inicialmente a 40°C promedio.
- ❖ Para refrigerar 10 módulos solares con el sistema de enfriamiento forzado propuesto en este trabajo son necesarios tres módulos solares de 85W con un inversor DC/AC con eficiencia del 90% para que alimenten la bomba centrífuga de agua.
- ❖ De la figura 24 y de los datos de la tabla 2 se concluye que, se puede obtener con el sistema de enfriamiento propuesto en este trabajo hasta un 20% de mayor rendimiento energético que en un módulo solar sin el sistema.
- ❖ 39 módulos de 85 vatios más un sistema de baterías, mas inversor DC/AC con eficiencia del 90% y más el sistema de enfriamiento funcionando al 85% (72,25W) en las 4 horas solar pico y considerando un mínimo 10% de energía extra para un total de 304,317KW, pueden suplir las necesidades de consumo energético de una familia de 3 personas en estrato 4, que consume mensualmente 228,5 KW a un precio de 481,94 pesos/KWh (total = 110.123,29 pesos)

- ❖ De la figura 24 y teniendo en cuenta que las condiciones climáticas cambian de una región a otra se concluye que, el sistema de refrigeración forzada para módulos fotovoltaicos propuesto en este estudio es operativamente viable en zonas cuya temperatura del ambiente máxima media anual de 30°C, de modo que el módulo solar junto al sistema de enfriamiento forzado alcance un funcionamiento de producción energética cerca al 85% de su capacidad.

- ❖ El sistema de refrigeración o climatización presentado en este trabajo y ubicado bajo tierra es viable en otro lugar, siempre y cuando la temperatura del terreno a la profundidad en la cual se va a instalar el sistema, no supere la temperatura del ambiente aéreo, y para esto se debe tener en cuenta los informes y estudios de suelos particulares de la región, así como los estudios climatológicos.

- ❖ Si bien es cierto que, en este trabajo de pasantía se obtuvieron resultados preliminares para el grupo GIEN-UAO y su proyecto macro de “Energías Alternativas”, se concluye que este estudio es significativo en cuanto a que, sirve de punto de partida para estudios futuros, y que, pueda ejecutarse en zonas donde las condiciones ambientales favorezcan el desarrollo de módulos solares fotovoltaicos con sistemas de refrigeración forzada, de modo que se pueda producir energía limpia con costos bajos y razonables.

- ❖ Sería conveniente como una proyección a este trabajo de pasantía, realizarlo bajo otras condiciones climáticas, aumentando los periodos de toma de datos y compararlos con los obtenidos de este proyecto, para poder vislumbrar los alcances de esta propuesta desarrollada

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Consejo Facultad Ciencias Naturales Exactas y de la Educación Universidad del Cauca, *Resolución NRO. 16*, Popayán, Cauca.
- [2] W. Earle, «Theoretical and operational thermal performance of a 'wet' crystalline silicon PV module under Jamaican conditions,» *Renewable Energy, EL SEVIER*, vol. 34, nº 6, pp. 1655-1660, Junio 2009.
- [3] S. KRAUTER, «Further Development of the integrated solar home system. UECE, Departamento de Física, Grupo de Energías Alternativas, Campus Itaperi, Fortaleza, Brazil,» de *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, España, 6-10 Junio 2005.
- [4] S. KRAUTER y et al., «Combined photovoltaic and solar thermal systems for facade integration and building insulation,» *Solar Energy, EL SEVIER*, vol. 67, nº 4-6, pp. 239-248, 1999.
- [5] Portal de Trabajos académicos Escuela técnica superior de ingeniería industrial y aeronautica, Universidad Politécnica de Cataluña, «Anexo II La energía solar Fotovoltaica,» [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7538/3/Anexo%20II%20-%20La%20energ%C3%ADa%20solar%20fotovoltaica.pdf>. [Último acceso: 18 Agosto 2014].
- [6] A. Nuñez Tello, M. L. Calvache Velazco y C. E. Alvarado Florez, «Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali,» Diciembre 2005. [En línea]. Available: <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/CALI/Informe%204%20Geotecnia.pdf>. [Último acceso: 18 Agosto 2014].
- [7] R. Espinace Abarzua, «Catedra Docente de Geotecnia, Tema Tipos de Suelos, Pontificia Universidad Católica de Valparaiso, Chile,» [En línea]. Available: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_m

s2/agua_en_los_suelos_1.pdf ;
http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/01_catedra/catedra.htm.
[Último acceso: 18 Agosto 2014].

- [8] «Estudio de Suelos y Diseño de Pavimentos Estación de Cañaveralejo,» [En línea]. Available: <http://www.metrocali.gov.co/cms/assets/descargas/Contratacion/MC-5.8.5.01.10/ANEXO-ESTUDIO-DE-SUELOS-Y-DISENO-DE-PAVIMENTOS-ESTACION-CANAVERALEJO.pdf>. [Último acceso: 18 Agosto 2014].
- [9] H. YUPING y et al, «Cooling System of Outdoor Cabinet using Underground Heat Pipe,» Huawei Technologies Co Ltd., Shenzhen, P.R. China, 2008.
- [10] E. Mands y B. Sanner, «Energía Geotérmica a poca Profundidad,» [En línea]. Available: <http://www.ubeg.de/downloads/EnergiaGeotermica.pdf>. [Último acceso: 01 Febrero 2014].
- [11] J. A. HERNÁNDEZ M., «Metodología para el análisis técnico de la masificación de sistemas fotovoltaicos como opción de generación distribuida en redes de baja tensión,» Bogotá D.C., 2012.
- [12] I. Pereda Soto, «Celdas Fotovoltaicas en Generación Distribuida,» Santiago de Chile, 2005.
- [13] R. Mendoza Pérez, «Desarrollo de Celdas Solares prototipo de CdTe con CdS procesado por baño químico,» México, 2007.
- [14] Proyecto SIMEC CHILE SRL, «Trabajo de incerción de la empresa SIMEC CHILE SRL en el mercado Energetico de Chile,» 2010. [En línea]. Available: http://www.unglobalcompact.org/system/attachments/8146/original/Proyecto_Simec_Chile.pdf?1287789602. [Último acceso: 18 08 2014].
- [15] P. A. Manrique Castillo y D. Martínez Castro, «REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA OPERACIONAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MEDIANTE USO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA SUPERFICIAL,» Propuesta de Investigación GIEN Y GITCoD, Facultad de Ingeniería Universidad

Autónoma de Occidente Cali, 2011.

- [16] O. A. Arenas Santamaría y A. M. Oviedo Pinzón, «Estudio técnico y financiero de implementación de paneles solares enfocado a centros comerciales,» Bucaramanga, 2009.
- [17] J. G. Guerrero Fernández, «Enfriamiento de Paneles Fotovoltaicos Mediante Aprovechamiento de Energía Geotérmica de Superficie,» Cali, 2012.
- [18] «Atlas de Radiación Solar de Colombia,» INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM Y LA UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, UPME. COLOMBIA, 2002.
- [19] H. Teo, P. Lee y M. Hawlader, «An active cooling system for photovoltaic modules,» *Applied Energy*, *ELSEVIER*, pp. 1-7, 05 Enero 2011.
- [20] H. Diaz Narvaez y F. Diez Cardona, «Análisis, modelado, simulación y validación de un sistema de generación de energía solar autónomo,» Cali, 2007.
- [21] G. Vokas, N. Christandonis y F. Skittides, «Hybrid photovoltaic–thermal systems for domestic heating and cooling: A theoretical approach,» *Solar Energy*, *EL SEVIER*, vol. 80, nº 5, pp. 607-615, Mayo 2006.
- [22] H. Saitoh y et al, «Field experiments and analyses on a hybrid solar collector,» *Applied Thermal Engineering*, *EL SEVIER*, vol. 23, nº 16, pp. 2089-2105, Noviembre 2003.
- [23] G. Llopis Trillo y V. R. Angulo, «Guía de la Energía Geotérmica, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-geotermica.pdf>. [Último acceso: 05 Febrero 2014].
- [24] H. L. Gasquet, «Conversión de la Luz Solar en Energía Eléctrica, Manual Teórico Práctico Sobre los Sistemas Fotovoltaicos,» Octubre 2004. [En línea]. Available: <http://www.solartronic.com/download/SistemasFV.pdf>. [Último acceso: 05 Febrero 2014].

- [25] J. M. Cuevas Castell y et al., «Propiedades térmicas de los suelos para el dimensionado y diseño del sistema subterráneo mejorando la eficiencia energética de sistemas geotérmicos en climatización,» 2010. [En línea]. Available:
http://www.messib.eu/assets/files/docs/GEOENER_Area%20I_Cuevas%20et%20al.pdf. [Último acceso: 05 Febrero 2014].
- [26] O. Cordobesa, «Energía solar térmica,» [En línea]. Available:
<http://www.olivacordobesa.es/ENERGIA%20SOLAR%20TERMICA.pdf>.
[Último acceso: 05 Febrero 2014].
- [27] A. D. Rida Gonzales, «Caracterización y Estudio de Paneles Híbridos Termofovoltaicos,» Madrid, 2012.

ANEXOS

ANEXO A.

Tabla 3. Tabla de datos de Temperaturas, Voltajes y Potencias del comportamiento del módulo fotovoltaico sin enfriamiento

Hora (hh:mm)	Hora (horas)	Temperatura Ambiente [°C]	Temperatura Módulo [°C]	Voltaje [V]	Potencia [W]
11:30	11,50	34,313	47,060	11,689	23,557
11:45	11,75	34,313	46,078	12,728	27,931
12:00	12,00	39,215	50,980	15,261	40,155
12:15	12,25	36,765	49,510	15,651	42,233
12:30	12,50	36,765	50,490	16,124	41,865
12:45	12,75	38,725	50,980	16,439	42,050
13:00	13,00	38,235	48,040	12,936	38,8802
13:15	13,25	37,745	47,060	12,733	32,992
13:30	13,50	35,785	44,608	12,388	34,201
13:45	13,75	36,275	45,098	13,426	37,498
14:00	14,00	39,215	50,490	13,897	33,298
14:15	14,25	39,215	50,000	13,053	29,376
14:30	14,50	39,215	48,530	12,559	34,417
14:45	14,75	39,215	46,568	13,116	35,286
15:00	15,00	39,215	40,195	10,975	31,767
15:15	15,25	37,745	41,668	10,327	29,049
15:30	15,50	36,765	41,178	9,39	28,009
15:45	15,75	35,785	38,725	8,144	27,799
16:00	16,00	35,295	36,765	7,642	27,043
16:15	16,25	33,333	33,823	7,144	25,719
16:30	16,50	32,843	31,373	5,494	24,385
16:45	16,75	32,843	30,393	4,234	22,263
17:00	17,00	31,863	30,393	3,169	19,236
17:15	17,25	31,863	29,413	2,779	17,105
17:30	17,50	29,413	27,450	2,065	15,419
17:45	17,75	28,433	26,470	1,779	14,043
18:00	18,00	27,940	24,510	1,665	12,67
18:15	18,25	27,450	24,020	1,065	10,289
18:30	18,50	26,960	24,020	0,865	7,3245
18:45	18,75	27,450	23,530	0,565	5,523
19:00	19,00	26,470	23,530	0,465	3,514
19:15	19,25	25,980	23,040	0,365	1,332
19:30	19,50	26,470	22,550	0,265	0,107

ANEXO B.

Tabla 4. Tabla de datos de Temperaturas, Voltajes y Potencias del comportamiento del módulo fotovoltaico con enfriamiento

Hora (hh:mm)	Hora (horas)	Temperatura Ambiente [°C]	Temperatura Módulo [°C]	Temperatura agua salida intercambiador [°C]	Voltaje [V]	Potencia [W]
11:30	11,50	34,313	43,160	29,41	15,456	41,188
11:45	11,75	34,313	41,768	35,29	15,846	43,292
12:00	12,00	39,215	46,098	35,29	16,846	44,292
12:15	12,25	36,765	44,608	33,33	17,456	45,188
12:30	12,50	36,765	43,628	33,33	17,079	44,640
12:45	12,75	38,725	45,255	35,29	17,741	45,360
13:00	13,00	38,235	44,178	33,33	15,598	41,953
13:15	13,25	37,745	42,715	35,29	14,872	38,134
13:30	13,50	35,785	40,668	33,33	14,469	37,806
13:45	13,75	36,275	41,505	31,37	15,689	42,057
14:00	14,00	39,215	44,705	33,33	15,910	42,052
14:15	14,25	39,215	44,215	33,33	14,521	38,085
14:30	14,50	39,215	42,745	31,37	14,547	37,875
14:45	14,75	39,215	41,765	37,25	15,783	42,345
15:00	15,00	39,215	39,575	39,22	13,689	37,114
15:15	15,25	37,745	40,123	33,33	14,055	37,131
15:30	15,50	36,765	39,353	39,22	13,146	36,863
15:45	15,75	35,785	37,883	33,33	12,137	35,821
16:00	16,00	35,295	36,213	31,37	12,078	35,744
16:15	16,25	33,333	33,533	27,45	11,904	35,485
16:30	16,50	32,843	31,570	33,33	11,104	35,210
16:45	16,75	32,843	30,520	29,41	10,864	34,855
17:00	17,00	31,863	30,980	29,41	10,429	34,352
17:15	17,25	31,863	30,560	33,33	9,079	28,418
17:30	17,50	29,413	28,321	29,41	8,925	27,830
17:45	17,75	28,433	26,500	31,37	7,065	22,538
18:00	18,00	27,94	25,510	31,37	6,837	20,670
18:15	18,25	27,45	25,146	27,45	6,837	16,289
18:30	18,50	26,96	25,058	29,41	5,065	14,358
18:45	18,75	27,45	25,250	27,45	4,065	10,230
19:00	19,00	26,47	24,470	29,41	2,065	7,230
19:15	19,25	25,98	23,060	27,45	1,065	4,403
19:30	19,50	26,47	22,760	25,49	0,413	0,303