

**CARACTERIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN
CONDICIONES TROPICALES BAJO LA INFLUENCIA DE UN TECHO VERDE.
CASO BUCARAMANGA**

EDGAR YESID HERNÁNDEZ CRISTANCHO

LUZ ESTHER QUINTERO SANGUINO

MIGUEL ANDRÉS TORRES ROMERO



**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2016

**CARACTERIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN
CONDICIONES TROPICALES BAJO LA INFLUENCIA DE UN TECHO VERDE.
CASO BUCARAMANGA**

EDGAR YESID HERNÁNDEZ CRISTANCHO

LUZ ESTHER QUINTERO SANGUINO

MIGUEL ANDRÉS TORRES ROMERO

**Trabajo de grado para optar por los títulos de
Ingenieros Electricistas e Ingeniero Electrónico.**

Director

Msc. German Alfonso Osma Pinto

Codirector

Dr. Gabriel Ordóñez Plata



**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2016

A mis padres Jeannette y Valentín, a mi hermana Angélica y mis sobrinos por su cariño y apoyo incondicional.

Luz Esther Quintero Sanguino

A mis padres Miguel y Carmen y a mis hermanos Mario y Marco por su amor y apoyo constante, pero sobre todo a mi mamá por su amor infinito y por qué todos los días de mi vida ha estado conmigo cerca o en la distancia.

A mis amigos que siempre me han acompañado a lo largo de este proceso y que de una u otra forma me han ayudado en mi formación como profesional.

Miguel Andres Torres Romero

A mi padre Edgar Hernández Ríos por su apoyo incondicional.

A mi familia por estar siempre atentos y ser de aliento en este proceso de formación.

A mis compañeros de estudio, a mis compañeros de proyecto viejo Migue y Luzquin y a la señora mamá de Liyen.

A Natalia Crusellas por su apoyo, dedicación, consejos y sugerencias.

Edgar Yesid Hernández Cristancho

AGRADECIMIENTOS

Especialmente nuestro guía incansable y director, el ingeniero German Alfonso Osma Pinto, por toda su colaboración, tiempo y apoyo brindando para el desarrollo de este proyecto.

A nuestro codirector, el Dr. Gabriel Ordoñez Plata, por su apoyo, sugerencias y correcciones a lo largo de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	19
1. OBJETIVOS.....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. MARCO TEÓRICO	21
2.1 ENERGÍA SOLAR	21
2.1.1 Radiación Solar.....	21
2.1.2 Irradiancia e Irradiación sobre superficies.....	22
2.2 RECURSO SOLAR DISPONIBLE EN BUCARAMANGA Y EN LA UIS....	22
2.3 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	23
2.4 CELDAS SOLARES FOTOVOLTAICAS.....	23
2.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	26
2.6 MICRO-INVERSORES	27
2.6.1 Ventajas	28
2.6.2 Desventajas	28
2.7 PROYECTOS EN COLOMBIA CON ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	28
2.8 EFECTO DE LOS TECHOS VERDES EN EL DESEMPEÑO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS.....	29
3. DISEÑO Y MONTAJE DEL SISTEMA GRIPV #1	31
3.1 ESTRUCTURA REQUERIDA PARA LA INSTALACIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS	31

3.2	SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	33
3.2.1	Paneles fotovoltaicos	34
3.2.2	Sistema de micro-inversores.....	35
3.2.3	Visualización de las variables del panel fotovoltaico a través del servidor web.....	37
3.3	DISEÑO DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DEL SISTEMA GRIPV #1 .	39
3.3.1	Conductores del sistema de corriente continua	40
3.3.2	Conductores del sistema de corriente alterna	40
3.3.3	Puesta a tierra.....	41
3.3.4	Protecciones	41
3.4	CUBIERTA VERDE – GRIPV #1	42
3.4.1	Visualización del impacto térmico del techo verde en el panel FV	44
4.	MONITORIZACIÓN REALIZADA A LOS SISTEMAS GRIPV # 1 Y GRIPV # 3	45
4.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA GRIPV #3	45
4.2	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE LAS VARIABLES ELÉCTRICAS DE LOS MICRO-INVERSORES.....	46
4.2.1	Sistema de adquisición de datos CDD del micro-inversor ABB	46
4.2.2	Sistema de adquisición de datos Envoy-C del micro-inversor Enphase	47
4.3	<i>DATALOGGERS</i>	48
4.4	MEDIDOR DE CORRIENTE CONTINUA DC-ACUDC 243	50
4.5	DESCRIPCIÓN DE LOS SENSORES DE RADIACIÓN SOLAR Y TEMPERATURA.....	52
4.5.1	Piranómetro Kipp&Zonen SMP3	53

4.5.2	Termocuplas	55
4.6	TRATAMIENTO DE ALTURAS DEL PANEL FV SOBRE EL TECHO VERDE	55
5.	ANÁLISIS DE LOS DATOS ADQUIRIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN REALIZADA.....	57
5.1	DESCRIPCIÓN DEL APLICATIVO DESARROLLADO.....	57
5.2	ANALISIS DE CASOS EN EL GRIPV #3.....	60
5.2.1	Caso I – Panel 6 (100 cm) - Panel 9 (125 cm)	60
5.2.2	Caso II – Panel 6 (100 cm) - Panel 9 (75 cm)	67
5.3	ANALISIS DE CASOS EN GRIPV #1	69
5.3.1	Caso I – Panel 1 (50 cm) – Panel 3 (75 cm)	69
5.3.2	Caso II – Panel 1 (25 cm) – Panel 3 (75 cm)	70
5.4	TABLA DE RESULTADOS	71
6.	CONCLUSIONES.....	72
7.	RECOMENDACIONES.....	75
	CITAS	76
	BIBLIOGRAFÍA.....	79
	ANEXOS.....	84

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Sistemas fotovoltaicos con micro-inversores conocidos en Colombia	29
Tabla 2. Características eléctricas del módulo Canadian Solar en STC	34
Tabla 3. Características básicas del Micro-Inversor ABB	35
Tabla 4. Especificaciones básicas del datalogger Pace.	49
Tabla 5. Especificaciones básicas del datalogger Omega	50
Tabla 6. Especificaciones básicas del AcuDC 243	51
Tabla 7. Cables por color del piranómetro SMP3	54
Tabla 8. Casos del experimento en GRIPV #3	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Circuito equivalente de una celda FV	23
Figura 2. Curvas de corriente-tensión y potencia-tensión de una celda FV	24
Figura 3. Relación I-V de un panel FV en función de la irradiancia	24
Figura 4. Curva I-V de una celda FV mono y policristalina en función de la temperatura.....	25
Figura 5. Sistema aislado	27
Figura 6. Micro-inversor ABB.....	27
Figura 7. Estructura para cada panel del sistema GRIPV #1	32
Figura 8. Fotografía del sistema GRIPV #1	33
Figura 9. Curvas IV del módulo Canadian Solar	34
Figura 10. Esquema de comunicación del micro-inversor ABB	36
Figura 11. Vista de paneles en servidor web del CDD.....	37
Figura 12. Vista de tabla en servidor web del CDD	38
Figura 13. Diagrama unifilar sistema GRIPV #1	39
Figura 14. Fotografía de la zona de techo verde del sistema GRIPV #1	43
Figura 15. Capas del sistema de cubierta verde.....	43
Figura 16. Ilustración del sistema GRIPV #3	45
Figura 17. Dispositivo concentrador de datos (CDD).....	47
Figura 18. Envoy-C	47
Figura 19. Comunicación del Envoy-C.....	48
Figura 20. Datalogger PACE.....	48
Figura 21. Datalogger Omega.....	49
Figura 22. AcuDC 243	50
Figura 23. Cableado de la fuente de alimentación del AcuDC 240.....	51

Figura 24. Conexión para la medida de corriente y tensión de la salida del panel fotovoltaico.....	52
Figura 25. Ubicación espacial de los sensores de radiación solar y temperatura instalados en el GRIPV #3.....	53
Figura 26. Partes del Piranómetro SMP3	54
Figura 27. Mecanismo para el control del viento en GRIPV #1.....	56
Figura 28. Menú principal del aplicativo	58
Figura 29. Ventana para la visualización de variables del GRIPV #3	59
Figura 30. Variables disponibles en el GRIPV #3.	59
Figura 31. Ventana para la visualización de variables del GRIPV #1	60
Figura 32. Gráfica de radiación solar medida durante el Caso I – GRIPV #3.....	61
Figura 33. Gráfica de la temperatura estimada durante el Caso I – GRIPV #3	62
Figura 34. Gráfica de temperatura promedio en el Día 1 – Caso I.....	63
Figura 35. Gráfica de temperatura promedio en el Día 2 – Caso I.....	63
Figura 36. Gráfica de temperatura promedio en el Día 3 – Caso I.....	64
Figura 37. Gráfica de la potencia generada por los paneles (DC) durante el Caso I – GRIPV #3.....	65
Figura 38. Gráfica de potencia a la salida de los micro-inversores (AC) durante el Caso I – GRIPV #3	66
Figura 39. Gráfica de radiación solar medida durante el Caso II – GRIPV #3	67
Figura 40. Gráfica de la potencia eléctrica generada por los paneles (DC) durante el Caso II – GRIPV #3	68
Figura 41. Gráfica de potencia eléctrica a la salida de los micro-inversores (AC) durante el Caso II – GRIPV #3.....	69
Figura 42. Gráfica de potencia eléctrica AC durante el Caso I – GRIPV #1	70
Figura 43. Gráfica de Potencia AC durante el Caso II – GRIPV #1	71
Figura 44. Tabla de resultados.	71

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Características técnicas de la estructura del sistema GRIPV#1	84
ANEXO B. Descripción detallada del aplicativo	87
ANEXO C. Cálculo de incertidumbres	102
ANEXO D. Certificado CIIMCA	110

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS EN CONDICIONES TROPICALES BAJO LA INFLUENCIA DE UN TECHO VERDE. CASO BUCARAMANGA*.

AUTORES: EDGAR YESIS HERNÁNDEZ CRISTANCHO, LUZ ESTHER QUINTERO SANGUINO, MIGUEL ANDRÉS TORRES ROMERO**.

PALABRAS CLAVES: Techo verde, estructura, panel fotovoltaico, energías renovables, micro-inversor, datalogger, altura, temperatura, radiación, Matlab, Guide.

DESCRIPCIÓN: El trabajo de grado presente contempla el diseño de un sistema de generación de energía eléctrica fotovoltaica integrado sobre la cubierta verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Industrial de Santander y conectado a la red eléctrica del edificio. Los módulos fotovoltaicos están soportados mediante estructuras que permite fijar la inclinación a 10 grados orientados hacia el sur y variar la altura entre el panel fotovoltaico y el techo verde entre 25 cm y 125 cm; considerando variables externas como la radiación solar y la temperatura circundante.

La integración del sistema de paneles solares sobre el techo verde se le conoce como GRIPV (Green Roof Integrated Photovoltaics). Según recientes estudios en lugares que presentan estaciones, esta integración contribuye a mitigar la temperatura circundante a los paneles y por ende se incrementa la potencia eléctrica generada. Es necesario establecer el comportamiento de un sistema GRIPV en una ciudad con clima cálido- tropical, como Bucaramanga, Colombia; donde se pudo establecer el impacto de la integración de los módulos fotovoltaicos instalados sobre la cubierta verde en el aumento de la generación de energía eléctrica.

La realización de este estudio involucró la implementación de equipos de monitorización, de radiación solar, temperatura y variables eléctricas como tensión, corriente y potencia eléctrica obtenidas a la salida de los módulos fotovoltaicos, además de dispositivos almacenadores de datos como son los dataloggers.

Para analizar los datos obtenidos por los equipos de monitorización, se requirió del diseño de un aplicativo en Matlab que permitió la visualización de manera gráfica el comportamiento de las variables con respecto al tiempo y concluir que las alturas favorables a las cuales deben ser instalados los paneles fotovoltaicos en la terraza del Edificio están entre 50 cm y 75 cm sobre el techo, para que haya un incremento de la energía generada.

* Proyecto de Investigación.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: German Alfonso Osma Pinto, Codirector: Gabriel Ordóñez Plata

ABSTRACT

TITLE: INFLUENCE OF A GREEN ROOF ON THE OPERATION OF PHOTOVOLTAIC PANELS UNDER TROPICAL CONDITIONS. IN THE CASE BUCARAMANGA*.

AUTHORS: EDGAR YESIS HERNÁNDEZ CRISTANCHO, LUZ ESTHER QUINTERO SANGUINO, MIGUEL ANDRÉS TORRES ROMERO**.

KEYWORDS: Green roof, structure, solar panel, renewable energy, micro-inverter, datalogger, height, temperature, radiation, Matlab, Guide.

DESCRIPTION: The bachelor thesis presented below includes the design of a system of photovoltaic power generation built on a green roof, connected directly to the electrical grid of the School of Electrical Engineering at the Industrial University of Santander. The photovoltaic modules facing south, are supported by a structure that permits the inclination to 10 degrees and vary the the height between 25 and 125 cm; considering external variables such as radiation and temperature of the surroundings.

When PV panels are simultaneously installed on a green roof, the whole system is called “Green Roof Integrated Photovoltaics – GRIPV system”. According to recent studies this integration contributes in certain manner to mitigate the temperature and consequently increases the power generated by the panels. These studies have been carried out in countries with temperate climate and so far not in tropical warm climate. Therefore, this study was conducted in Bucaramanga, Colombia. There, it was possible to show the PV panel's impact on the green roof under tropical conditions causing an increased generation of electricity and to confirm previous studies.

The realization of this study involved the implementation of measuring equipment for radiation, temperature and electrical variables such as voltage, current and power generated by the photovoltaic modules. Dataloggers have also been installed to collect the data analyzed in this study.

For the analysis of the data obtained by the measuring equipment, we performed an application in Matlab that allowed the visualization of the temperature, radiation and power with respect to time. In conclusion the study shows, that in this case photovoltaic panels installed in heights between 50 cm and 75 cm prove to have an increased electrical output.

* Research Project.

** Faculty of Mechanical Physical Engineering. School of Electrical, Electronic Engineering and Telecommunications. Director: German Alfonso Osma Pinto, Codirector: Gabriel Ordóñez Plata

INTRODUCCIÓN

La energía solar como recurso renovable es una alternativa para la generación de energía eléctrica. Su uso contribuye a la disminución del impacto ambiental que provocan las fuentes de energía convencionales. El aprovechamiento de esta energía es logrado mediante el uso de módulos fotovoltaicos (FV), actualmente en auge ya que contribuyen a la descentralización energética permitiendo un mayor equilibrio económico y participación del usuario en el proceso de generación y consumo [1]. Un inconveniente de este tipo de sistemas es que no son 100% eficientes; ya que los módulos FV se ven afectados en su rendimiento energético por las condiciones climáticas. Factores como la temperatura del panel reducen la eficiencia del sistema conforme ésta se incrementa.

En la Universidad Industrial de Santander se han venido realizando proyectos relacionados con paneles fotovoltaicos, desde técnicas de control e implementación de convertidores DC-DC para el seguimiento del punto MPPT¹ [2], [3], el control en inversores DC-AC para la inyección de corriente a la red con las condiciones requeridas [4], estudios del potencial solar y potencial de generación de energía eléctrica en el campus central [5], [6], micro-redes para suministro de energía eléctrica [7], [8], hasta simulaciones por medio de herramientas computacionales [9]. Todo esto con el fin de diseñar y poner en marcha sistemas fotovoltaicos de los cuales obtener el mayor beneficio posible.

Por otra parte, los techos verdes juegan un papel importante en el desarrollo proyectos de este tipo. Diversas investigaciones muestran que se puede disminuir la temperatura de trabajo de los módulos FV cuando se usan capas verdes en conjunto con los paneles FV [10]. En este orden de ideas es importante el estudio del comportamiento de los paneles solares en condiciones tropicales, en entornos con techos verdes; para establecer proyecciones reales de generación de energía eléctrica de un sistema fotovoltaico en estas condiciones.

La ejecución de este trabajo de grado se realizó en la terraza del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la UIS, para utilizar el techo verde que allí se encuentra instalado. En primera instancia se construyeron las estructuras que soportan los paneles fotovoltaicos y permiten variar la altura de estos, para luego integrar al sistema micro-inversores conectados a la red del edificio, junto con un sistema de monitorización para variables eléctricas (tensión y corriente) y ambientales (radiación solar y temperatura). De esta manera se realizó la caracterización de la operación del panel FV considerando el efecto del techo verde.

¹ **MPPT**: Maximum Power Point Tracking, Seguimiento del Punto de Máxima Potencia.

1. OBJETIVOS

Para la realización de este trabajo de grado se plantearon los objetivos que se describen a continuación.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la caracterización de la operación de un panel fotovoltaico de 255 Wp según condiciones climáticas específicas de la ciudad de Bucaramanga y variaciones de la altura de instalación del panel sobre techo verde.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- 1)** Realizar el diseño y montaje de un sistema de generación fotovoltaico de conexión directa a la red eléctrica del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander por medio de micro-inversores, en conjunto con una capa de techo verde portátil.
- 2)** Implementar dispositivos de adquisición de datos para la monitorización, a diferentes alturas (0,25; 0,50; 0,75; 1 y 1,25 m) y 10° de inclinación de los módulos FV sobre la cubierta verde. Los datos adquiridos son: la tensión y corriente de cada módulo FV y de los micro-inversores, la temperatura del panel y un piranómetro para monitorizar la radiación solar.
- 3)** Desarrollar un aplicativo con interfaz de usuario de MATLAB que permita el análisis y visualización del histórico de datos de parámetros de las variables eléctricas (tensión y corriente) y ambientales (radiación solar y temperatura) monitorizados bajo la influencia del techo verde.

2. MARCO TEÓRICO

Los sistemas de fotovoltaicos son una fuente renovable de energía que genera energía eléctrica por medio de celdas solares. Cuando los paneles fotovoltaicos son instalados sobre un techo verde, a este sistema se le denomina Green Roof Integrated Photovoltaics - sistemas GRIPV [11]. Esta integración permite que el techo verde mitigue en parte el impacto de la temperatura en los paneles FV y como consecuencia se incrementa la potencia de salida del panel.

En esta sección se tratan conceptos básicos sobre la energía solar fotovoltaica, el proceso de conversión de la luz directa del sol en energía eléctrica a través de celdas solares mediante el fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico. Al final del capítulo se describe como un techo verde beneficia la operación de un panel fotovoltaico para incrementar la potencia eléctrica generada por él.

2.1 ENERGÍA SOLAR

El Sol es la fuente de energía de la tierra. Se recibe en forma de radiación que retiene la atmosfera. La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía renovable y por tanto inagotable, permite transformar en electricidad la radiación solar por medio de células fotovoltaicas integrantes de módulos solares. Esta electricidad se puede utilizar de manera directa, se puede almacenar en acumuladores para un uso posterior, e incluso se puede introducir en la red de distribución eléctrica [12].

En Colombia actualmente es poco el uso de la energía solar, se emplea en menor medida en telecomunicaciones para alimentar repetidores y en aplicaciones domésticas para lugares lejanos donde no hay interconexión eléctrica [13], la integración de este tipo de energías al sistema energético nacional está regulada por medio de la ley 1715 del 13 de mayo del 2014.

2.1.1 Radiación Solar

La radiación solar es la energía que emite el sol en forma de ondas electromagnéticas; esta se divide en luz visible, rayos infrarrojos y rayos ultravioletas [13]. En función de cómo inciden los rayos en la tierra se distinguen tres componentes de la radiación solar las cuales son radiación directa, difusa y reflejada [12].

Radiación directa (H_b). Es aquella radiación que es percibida por la superficie terrestre directamente del sol, sin haber sufrido ningún cambio.

Radiación difusa (H_d). Radiación que al momento de atravesar la atmosfera es absorbida o reflejada por las nubes y por ende se dirige en todas las direcciones.

Radiación reflejada. Radiación que, al llegar a la superficie terrestre, es reflejada por la misma. La cantidad de radiación reflejada depende del coeficiente de reflexión de la superficie, al cual se le denomina albedo.

2.1.2 Irradiancia e Irradiación sobre superficies

La energía generada por el Sol llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética. Para cuantificar la potencia y la energía de la radiación solar por unidad de superficie, se utilizan, respectivamente, la irradiancia y la irradiación solar. La irradiancia es la potencia de la radiación solar recibida por unidad de superficie. Se mide en W/m^2 o kW/m^2 . La energía recibida por unidad de superficie durante un tiempo determinado se define como irradiación y mide en Wh/m^2 o kWh/m^2 [14].

2.2 RECURSO SOLAR DISPONIBLE EN BUCARAMANGA Y EN LA UIS

La ciudad de Bucaramanga cuenta con un recurso solar adecuado para el desarrollo de proyectos de generación a partir de módulos fotovoltaicos. En Bucaramanga hay evidencias que muestran que, durante más del 87,2% de los días del año se cumple que la radiación es mayor a $1 kWh/m^2$ con un promedio diario de $4,6 kWh/m^2$ donde la gran mayoría de los días del año son soleados y despejados [5].

Asimismo, en el campus central de la Universidad Industrial de Santander, sitio de interés para el desarrollo de este trabajo de grado, la radiación promedio diaria es de $4,6 kWh/m^2$, que se traduce en un abastecimiento anual de $1186,6 kWh/m^2$ teniendo radiaciones diarias máxima y mínima de $6,93 kWh/m^2$ y $1,63 kWh/m^2$ respectivamente según datos del 2011 [5]. El comportamiento de este recurso es cuasi-estable en el transcurso del año.

2.3 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

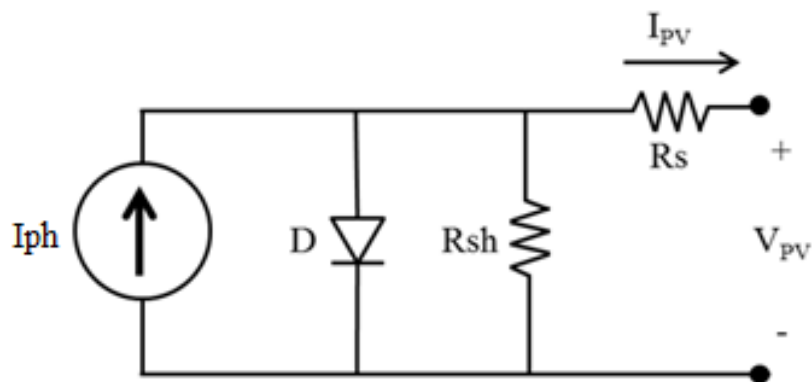
La energía solar fotovoltaica se obtiene captando la energía del Sol y transformándola en energía eléctrica por medio de celdas FV. Los materiales semiconductores, utilizados en la elaboración de celdas FV deben ser producidos con purzas muy altas; normalmente con estructura cristalina. Dicha conversión se realiza de manera limpia y directa. Existen dos elementos que sustentan la utilización de la energía FV: “La necesidad de proteger el medio ambiente y la necesidad de crecer económicamente” [7].

2.4 CELDAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

La conversión de la radiación solar en corriente eléctrica tiene lugar en célula fotovoltaica. Cada célula fotovoltaica se compone de una delgada capa de material tipo “n” y otra de mayor espesor de material tipo “p”. Ambas capas separadas son eléctricamente neutras, y al juntarlas se genera un campo eléctrico en la unión “p-n” [12].

La Figura 1 muestra el circuito equivalente de una celda FV, donde I_{ph} representa la corriente generada por la radiación solar, R_s es una resistencia que representa las pérdidas de potencia causadas por los diferentes contactos y conexiones y R_{sh} es una resistencia que representa la corriente de fuga del diodo. Las variables I_{PV} y V_{PV} corresponden a la corriente y tensión generados por el panel fotovoltaico respectivamente [14].

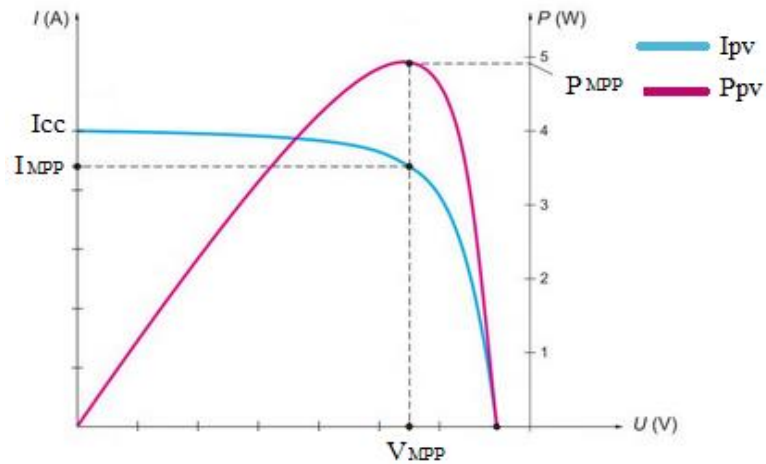
Figura 1. Circuito equivalente de una celda FV



Fuente: [14]

Las curvas características de corriente y potencia en función de la tensión de un panel FV se muestran en la Figura 2. Se observa que en la curva de potencia hay un máximo denominado punto de máxima potencia (MPP) al que le corresponden unos valores de corriente (I_{MPP}) y de tensión (V_{MPP}) [15].

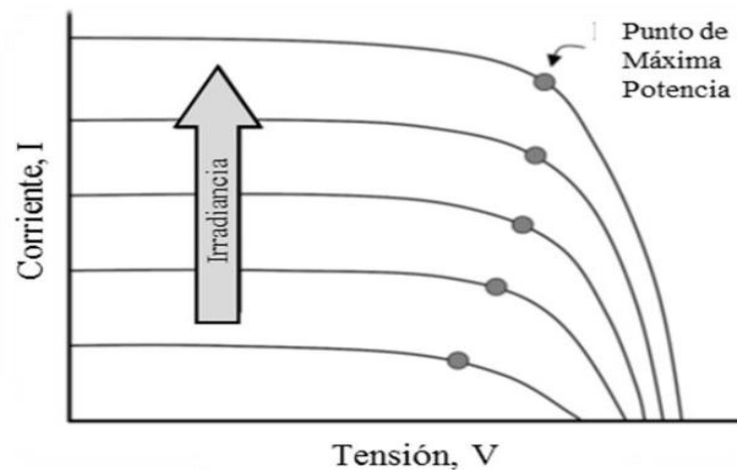
Figura 2. Curvas de corriente-tensión y potencia-tensión de una celda FV



Fuente: [15]

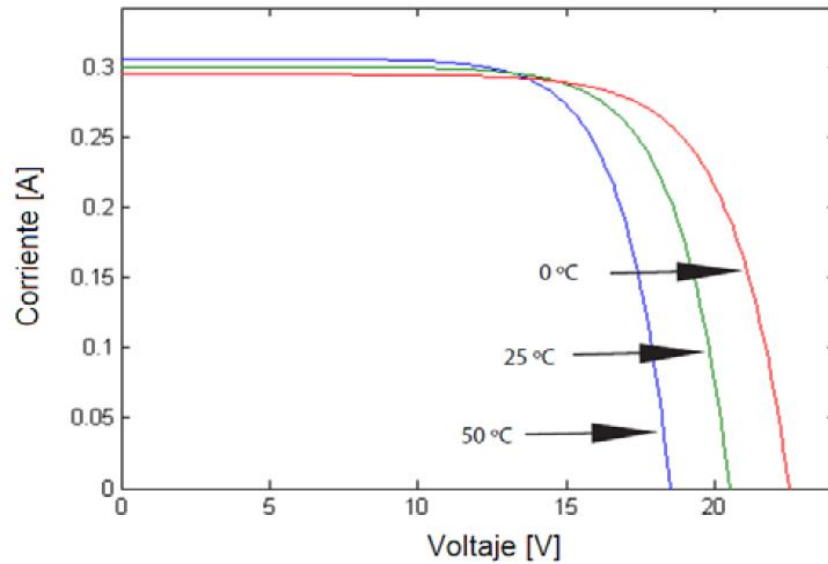
El punto de máxima potencia y la curva I-V varían según el cambio de las condiciones de operación del panel. Las variables de irradiancia y temperatura modifican las variables de tensión, corriente y potencia de operación del panel como se muestra en las figuras Figura 3 y Figura 4.

Figura 3. Relación I-V de un panel FV en función de la irradiancia



Fuente: [2]

Figura 4. Curva I-V de una celda FV mono y policristalina en función de la temperatura



Fuente: [16]

Existen modelos matemáticos que permiten calcular la potencia generada por cada panel, el modelo dinámico consiste en expresar la corriente y potencia generada del panel en función de la radiación solar incidente y la temperatura ambiente [17]. A continuación, se presentan algunas de las ecuaciones del planteamiento del modelado matemático basado en las especificaciones técnicas comerciales de los módulos FV.

Corriente de máxima potencia en función de la radiación solar y temperatura de operación [17].

$$I_m = I_{mpr} \frac{G}{1000} \left(1 + \alpha_{mp} \cdot (T_{cell} - 25) \right) \quad (2.1)$$

Tensión de máxima potencia en función de la radiación solar y la temperatura de operación [17].

$$V_m = V_T \cdot \ln \left(1 + \frac{I_{SC} - I_m}{I_{SC}} \left(e^{\frac{V_{OC}}{V_T}} - 1 \right) - I_m \cdot R_S \right) \quad (2.2)$$

Donde:

G : Radiación solar incidente [W/m^2]

α_{mp} : Coeficiente térmico de corriente de máxima potencia $\left[\frac{1}{^\circ C}\right]$

T_{cell} : Temperatura de operación de las celdas fotovoltaicas [$^\circ C$]

V_T : Potencial térmico [V]

I_{mpr} : corriente de máxima potencia [A]

V_{ocr} : Tensión de circuito abierto [V]

I_{scr} : Corriente de corto circuito [A]

2.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los sistemas fotovoltaicos son sistemas de generación de energía eléctrica a partir de la energía solar fotovoltaica. Estos sistemas pueden suministrar energía eléctrica generada a partir de la radiación solar que incide sobre las celdas FV. La cantidad de potencia eléctrica que el sistema genera cuando el sol forma un ángulo de 90° con las celdas FV se mide en unidades de Wp^2 a una radiación de $1 \text{ kW}/m^2$ y temperatura de $25 \text{ }^\circ C$ (Condiciones estándares de prueba - STC^3).

Los sistemas de generación de energía eléctrica con paneles fotovoltaicos están conformados por un conjunto de dispositivos electrónicos dependiendo el tipo de sistema que se desee tales como: bancos de baterías encargados de almacenar la energía eléctrica, controladores de carga para proteger a las baterías de sobrecargas y descargas excesivas, inversores para suministrar energía eléctrica a las cargas que funcionen en corriente alterna, entre otros [13]. Todos los sistemas fotovoltaicos tienen en común que requieren módulos FV, encargados de transformar la radiación proveniente del sol en energía eléctrica.

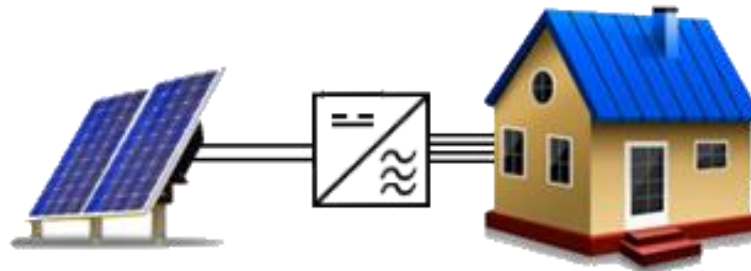
Los sistemas fotovoltaicos tienen distintas configuraciones dependiendo de las necesidades energéticas, tales como sistemas aislados (Off Grid), híbridos y conectados a la red (Grid Tie) [9].

² **Wp**: Watt pico

³ **STC**: Standard Test Conditions

Los sistemas Off Grid alimentan directamente una carga, son usados principalmente en lugares donde no hay interconexión con la red eléctrica. Los sistemas Grid Tie inyectan energía eléctrica a la red pública. Requieren de una etapa de acondicionamiento a partir de inversores y sistemas específicos que permiten el flujo y control de la energía eléctrica. Su aplicación se da en áreas urbanas o en grandes plantas de producción en zonas alejadas a las ciudades [9]. En la Figura 5 se muestra un esquema de un sistema aislado (Off Grid)

Figura 5. Sistema aislado



2.6 MICRO-INVERSORES

Los micro-inversores son dispositivos compactos que transforman la corriente continua del módulo FV en corriente alterna. Estos pequeños inversores están diseñados para controlar el funcionamiento de un solo panel, aunque también se manejan modelos dúo que permiten la conexión de dos paneles FV. La Figura 6 muestra uno de los micro-inversores utilizados en este trabajo de grado.

Figura 6. Micro-inversor ABB



Fuente: ABB. Solar inverters. One of the broadest solar inverter portfolios in the industry [En línea] [Bogotá: COL.] ABB, 2016. [Citado 13 septiembre 2015]. Disponible en Internet: <http://new.abb.com/power-converters-inverters/solar>

2.6.1 Ventajas

Una de las principales ventajas de un micro-inversor es su vida útil de aproximadamente 25 años, en contraste con los inversores convencionales cuya vida útil suele ser 15 años. La instalación es más sencilla y rápida que la de un inversor convencional. Las dimensiones son más pequeñas que las de un inversor convencional, lo cual permite que el diseño del sistema fotovoltaico necesite un área más reducida [18]. El uso de micro-inversores mejora la seguridad, al realizarse la conversión de energía de DC a AC en cada módulo fotovoltaico, se elimina el cableado de alta tensión de DC [19], por lo tanto no existe ni tensión ni corriente potencialmente peligrosas.

Los micro-inversores permiten a cada módulo fotovoltaico operar en el punto donde alcanzan su máxima potencia reduciendo así el efecto “*mismatch*” [20], que son las pérdidas causadas por la interconexión de módulos fotovoltaicos que no tienen las mismas propiedades o que operan bajo condiciones de radiación y temperaturas distintas [21].

2.6.2 Desventajas

Son más costosos considerando el dinero requerido por potencia generada (\$/watt) y su eficiencia es un poco más baja que en un inversor central. El mantenimiento puede ser más complicado dado que son varias unidades en una configuración de paneles solares. Comparado con un inversor central no hay mucha variedad en el mercado. Son propensos a presentar problemas a temperaturas altas debido a que se instalan debajo del panel solar [18].

2.7 PROYECTOS EN COLOMBIA CON ENERGIA FOTOVOLTAICA

Colombia cuenta con un gran recurso de energía solar por su ubicación en la zona ecuatorial, la radiación media es de 4,5 kWh/m² y el área con mejor recurso solar es la Guajira. De los 6 MW de energía solar producidos en Colombia en la actualidad (equivalente a aproximadamente 78 000 paneles solares), el 57% está distribuido para aplicaciones rurales y el 43% para torres de comunicación y señalizaciones de tránsito. En la Tabla 1 se listan algunos de los proyectos de energía solar fotovoltaica realizados en el país que se implementan micro-inversores [22].

Tabla 1. Sistemas fotovoltaicos con micro-inversores conocidos en Colombia

Ubicación	Capacidad	Micro-inversor	Tipo de sistema	Título o descripción
B/manga (Santander)	3,93 kWp	Enphase M215	Conectado a la red	IONANTHA Apartamentos [23]
B/manga (Santander)			Conectado a la red	Energía solar directa a red sector educativo [23]
Medellín (Antioquia)	4,9 kWp		Conectado a la red	Proyecto micro-inversores UPB [24]
Cali (Valle del Cauca)	195 Wp	Enphase M200	Conectado a la red	Edificio Santa Mónica [25]

2.8 EFECTO DE LOS TECHOS VERDES EN EL DESEMPEÑO DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

Los techos verdes y los sistemas de energía solar fotovoltaica son dos tecnologías que contribuyen al desarrollo de construcciones sostenibles y a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. Cuando se combinan estas dos tecnologías, el techo verde disminuye la temperatura alrededor del panel fotovoltaico permitiendo un mejor funcionamiento [10]. Según la investigación de Köhler se obtuvieron resultados prometedores revelando que un sistema fotovoltaico sobre un techo verde es 6% más eficiente que en techos convencionales [26].

Köhler con un experimento en Berlín estudió varios sistemas GRIPV, basados en diferentes configuraciones, en su mayoría con especies vegetales de Sedum. El sistema GRIPV fue comparado con un sistema de paneles fotovoltaicos instalados sobre asfalto (FV-asfalto). Para algunos casos las configuraciones GRIPV mostraron un incremento en la eficiencia de los paneles mientras que en los casos de FV-Asfalto mostraba un aumento de la potencia de salida, en función de las características específicas de cada sistema. Cabe mencionar que los autores notaron que había muchos efectos superpuestos (tales como el reflejo de la luz solar desde otros paneles FV, etc.) [11].

Asimismo se realizaron experimentos en Hong Kong donde lograron demostrar que un sistema integrado de paneles FV con techo verde presenta una temperatura de funcionamiento entre 5°C y 11°C más baja que un sistema de paneles FV instalado en una terraza sin techo verde, corroborando el aumento de la eficiencia de los paneles FV [10].

En Pittsburgh Pennsylvania también se realizaron mediciones de sistema integrado de paneles FV con techo verde durante un año para determinar la diferencia en la potencia de salida del sistema de paneles FV instalado sobre el techo verde con relación a un sistema de paneles FV instalado sobre un techo en negro (EPDM⁴) cuyo resultado fue un aumento del 0,5% en la generación de los paneles sobre techo verde [27].

Es de resaltar que todos estos análisis que evidencian el beneficio mutuo entre los sistemas FV y techos verdes han sido realizados en lugares donde hay estaciones climáticas lo cual reduce los tiempos de estudio debido a estos cambios climáticos. La ubicación geográfica del sitio donde se instalan los paneles FV tiene una gran incidencia en la generación de potencia eléctrica, por lo cual se requiere realizar estudios en zonas donde no hay estaciones como la zona tropical. En el caso de Colombia se tiene una gran diversidad de climas, dependiendo de la ubicación geográfica del sitio sobre el nivel del mar y otras variables como la humedad relativa, etc.

⁴ EPDM: Copolímero de etileno propileno dieno monómero.

3. DISEÑO Y MONTAJE DEL SISTEMA GRIPV #1

En esta sección se presenta el diseño e implementación de un sistema GRIPV con conexión directa a la red y se expone cómo se realizó la instalación eléctrica y la infraestructura requerida para el montaje de los paneles, así como las especificaciones básicas de los elementos que componen este sistema GRIPV.

El sistema GRIPV #1 se encuentra instalado en la terraza del sexto piso del edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander que tiene instalada un área de 440 m² de cubierta verde (Sedum).

3.1 ESTRUCTURA REQUERIDA PARA LA INSTALACIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

El aprovechamiento óptimo de la energía solar requiere que los módulos FV dispongan de la inclinación y orientación adecuadas para aprovechar al máximo la radiación solar. Esto sujeto a consideraciones como superficie ocupada por el número de paneles necesarios en la aplicación, la dificultad de su integración directa en edificaciones existentes (actuando los módulos como elementos estructurales y de cerramiento) y los efectos perjudiciales que un sombreado parcial de los módulos ejerce sobre la generación fotovoltaica, hace necesaria la inclusión en el sistema de una estructura de soporte adecuada [28].

La estructura de soporte de los paneles FV es un elemento auxiliar que debe ser adecuado para su instalación en la intemperie, razón por la cual el sistema de soporte de los paneles FV se construyó con materiales protegidos contra fenómenos de corrosión, utilizando como material aluminio anodizado. Los módulos FV se fijaron sobre la estructura con tornillería de aluminio anodizado o acero inoxidable para evitar pares galvánicos y corrosiones.

La estructura cumple tres funciones principales:

- Actúa de armazón, confiriendo rigidez al conjunto de módulos FV, y adaptando la geometría y disposición del panel FV.
- Sitúa los módulos FV en una orientación e inclinación adecuadas.

- Sirve como elemento intermedio para la unión de los módulos FV con las bases de concreto dispuestas en la terraza para soportar las cargas máximas producidas por el viento previsto en el lugar.

En general se pueden distinguir dos tipos de estructuras, las apoyadas directamente sobre el suelo (o superficie) y las apoyadas en un mástil. Para este proyecto el tipo de estructura que se eligió fue una estructura sobre superficie por motivos tales como disposición de la terraza, por seguridad personal, fácil acceso a sus componentes e instalación, economía y número de paneles.

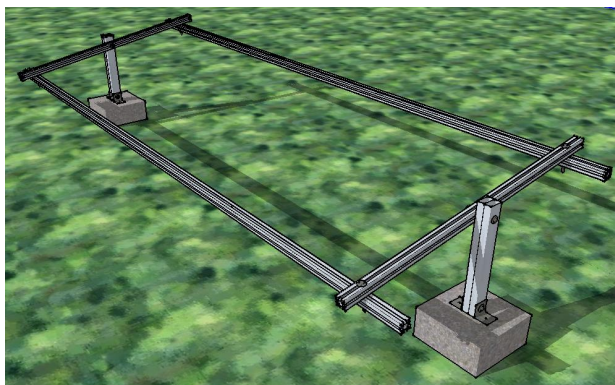
A continuación, se describen las características de la estructura utilizada:

- Precisa de dos puntos de apoyo.
- Su diseño es modular facilitando la colocación de varios paneles.
- La fijación de los módulos FV es sencilla, sin la necesidad de medios mecánicos auxiliares.
- La variación de altura supone del cambio de los parales de apoyo.
- Ofrece una orientación fija e inclinación variable.

En la Figura 7 se muestra la estructura que va acoplada sobre las bases de concreto de las que dispone la terraza del edificio de Ingeniería Eléctrica, diseñada para soportar cada uno de los paneles del sistema GRIPV #1. Este diseño fue simulado con el software Sketchup. En el ANEXOS

ANEXO A se describen las partes y el proceso de construcción de la estructura.

Figura 7. Estructura para cada panel del sistema GRIPV #1



3.2 SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

El sistema de generación está conformado por dos módulos FV de 255 W y uno de 250 W poli-cristalinos de 60 celdas cada uno, conectado a un micro-inversor ABB tal como se muestra en la Figura 8. La energía eléctrica generada por cada uno de los paneles se inyecta a la red eléctrica del edificio de Ingeniería Eléctrica en tiempo real, teniendo como punto de conexión el tablero de conexiones del cuarto piso del edificio. A continuación, se presentan las características del sistema de generación FV

Figura 8. Fotografía del sistema GRIPV #1



3.2.1 Paneles fotovoltaicos

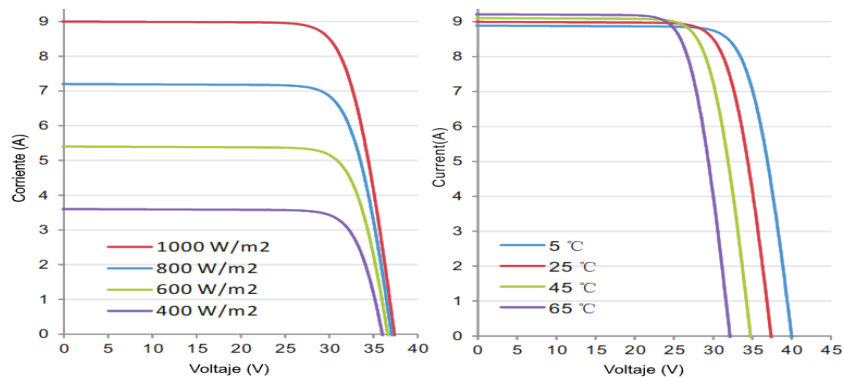
El sistema GRIPV #1 tiene dos módulos Canadian Solar de 255 W (los paneles 1 y 3) y otro módulo UPSOLAR de 250 W (panel 2). Las características mecánicas de los tres paneles son similares y se describen junto a las características eléctricas de los paneles 1 y 3 en la Tabla 2.

Tabla 2. Características eléctricas del módulo Canadian Solar en STC

PANEL FV CS6P-255P	
Características eléctricas	
Potencia máxima Pm	255 Wp
Máxima tensión de operación Vm	30,2 V
Máxima corriente de operación Im	8,43 A
Tensión de circuito abierto Voc	37,4 V
Corriente de corto circuito Isc	9 A
Eficiencia del módulo	15,85%
Especificaciones mecánicas	
Celdas	Células de silicio policristalino 156 x 156 mm
Número de celdas	60 (6x10)
Dimensiones	1640 x 992 x40 mm
Peso	19,0 kg

El comportamiento típico de las curvas IV que presenta el panel Canadian Solar a diferentes valores de radiación solar y temperatura se muestra la Figura 9.

Figura 9. Curvas IV del módulo Canadian Solar



Fuente: Canadian Solar. CS6P-250|255|260P [En línea]. Krannich, 2016. [Citado 14 febrero 2016]. Disponible en Internet: http://usa.krannich-solar.com/fileadmin/content/data_sheets/solar_modules/usa/CS6P-250-260P.PDF

La elección de la mejor inclinación del panel FV que permita obtener una mayor absorción de la energía procedente del sol se logra inclinando los módulos de manera que los rayos solares incidan perpendicularmente la mayor cantidad de tiempo a lo largo del año. En la mayoría de los casos el ángulo de inclinación es igual a la latitud con el módulo orientado hacia el Sur [7]. Para este estudio se inclinaron los paneles a 10° que es cercano a los 7,13° (latitud en Bucaramanga) y porque se recomienda que la inclinación no sea inferior a 10 °C para que los módulos FV se limpien por precipitaciones de lluvia.

3.2.2 Sistema de micro-inversores

Los micro-inversores Powerone / ABB modelo 250-265W MICRO-0.25-I-OUTD cuentan con un algoritmo MPPT que trabaja en el nivel de cada panel solar en cualquier condición de luz con una eficiencia máxima de 96,5%. Estos micro-inversores pueden estar instalados al aire libre para su uso sin restricciones bajo cualquier condición ambiental y presentan las características básicas mostradas en la Tabla 3.

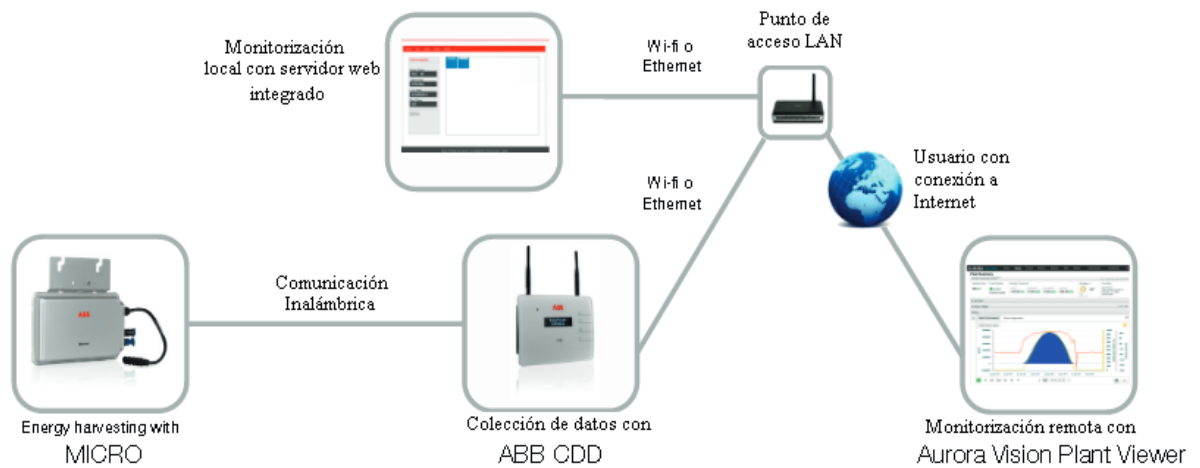
Tabla 3. Características básicas del Micro-Inversor ABB

MICRO-INVERSOR ABB	
Especificaciones mecánicas	
Grado de protección	NEMA 4X
Dimensiones	266 x 246 x 35 mm
Peso	1,65 kg
Características eléctricas	
Potencia de salida nominal/máxima	250W/260 W

Tensión nominal AC	208 V	240 V		
Entrada DC				
Potencia máxima utilizable	265 Wp			
Máxima calificación panel FV (STC)	300 W			
Tensión [V]	Vmax	Vstart	MTTP	Funcionamiento
	65	25	25 - 60	12 - 60
Corriente máxima utilizable	10,5 A			
Salida AC				
Rango de tensión	183V-228 V	211V-264 V		
Frecuencia nominal	60 Hz			
Corriente de salida máxima	1.20 A	1.04 A		
Factor de potencia	>0,95			
Eficiencia				
Máxima eficiencia	96,5%			

Este tipo de micro-inversor se comunica por conexión inalámbrica a través de un Dispositivo Concentrador de Datos (CDD) formando el sistema micro-inversor del GRIPV #1. El CDD permite la monitorización inalámbrica del sistema en tiempo real, resolución de problemas y retroalimentación. La visualización remota de los datos se realiza por medio de una plataforma llamada Aurora Vision Plant Viewer. La Figura 10 muestra el esquema de comunicación de este micro-inversor.

Figura 10. Esquema de comunicación del micro-inversor ABB



Fuente: ABB. ABB micro invertir system [En línea]. ABB, 2016. [Citado 14 febrero 2016]. Disponible en Internet: https://library.e.abb.com/public/0ac164c3b03678c085257cbd0061a446/MICRO-CDD_BCD.00373_EN.pdf

3.2.3 Visualización de las variables del panel fotovoltaico a través del servidor web

Para la comunidad UIS la visualización de la información en tiempo real del sistema GRIPV #1 está disponible a través del servidor web integrado al CDD. Para tener acceso a dicha información se debe ingresar desde la red de área local (LAN) de la universidad a la dirección 192.168.46.246.

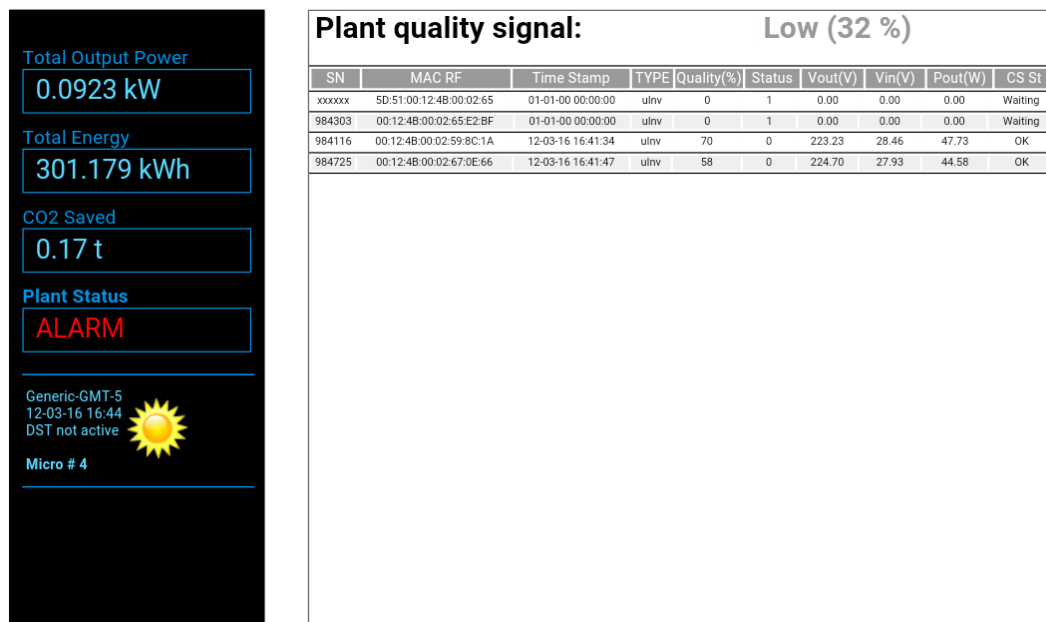
En el servidor web del CDD se puede encontrar la tensión y potencia generada por cada panel, potencia de salida de cada micro-inversor y del sistema completo, además del estado del sistema. Como se muestra en las figuras Figura 11 y Figura 12.

Figura 11. Vista de paneles en servidor web del CDD



Fuente: Extraído de 192.168.46.246. Disponible dentro de la red de la UIS.

Figura 12. Vista de tabla en servidor web del CDD

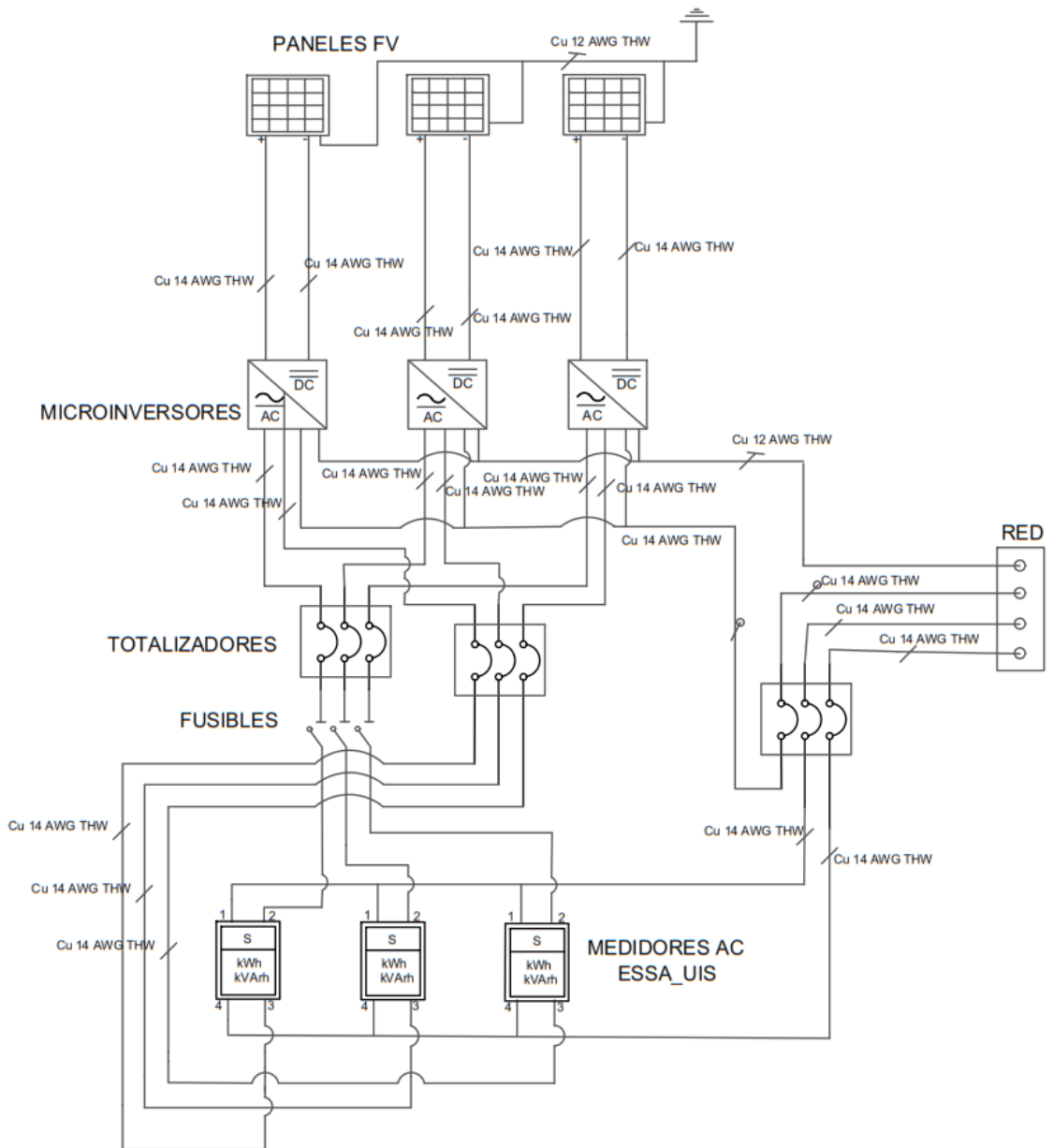


Fuente: Extraído de 192.168.46.246. Disponible dentro de la red de la UIS.

3.3 DISEÑO DE LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DEL SISTEMA GRIPV #1

En el diseño de la instalación eléctrica del sistema de generación fotovoltaico GRIPV #1 se consideraron en primera instancia las especificaciones de la Norma NTC-2050 para el uso de los conductores y protecciones. En la Figura 13 se presenta el diagrama unifilar de la instalación eléctrica de este sistema.

Figura 13. Diagrama unifilar sistema GRIPV #1



3.3.1 Conductores del sistema de corriente continua

Los conductores de los módulos FV se conectan directamente al inversor, pero en este caso se añadió por medio de conectores MC-4 un tramo de conductor calibre 14 AWG THW Cu con una capacidad máxima de corriente de 15 A con el fin hacer los empalmes para realizar la monitorización de la señal de tensión. Para la selección del calibre del conductor se consideró que la máxima corriente que puede generar el panel FV es de 8,43 A y según la sección 690-8 a) de la NTC 2050 se debe ajustar la capacidad de corriente de los conductores, lo cual no debe ser inferior al 125% de la calculada. En este caso la capacidad de corriente de los conductores es:

$$I_C = 8,43 \cdot 1,25 = 10,54 \text{ A}$$

3.3.2 Conductores del sistema de corriente alterna

El calibre del conductor utilizado para la conexión en corriente alterna (desde el micro-inversor hasta el tablero de distribución del cuarto piso del Edificio de Ingeniería Eléctrica) es cable Cu 14 AWG THW con una capacidad máxima de corriente de 15 A, para las fases y el neutro. Estas consideraciones dado que la máxima corriente que puede generar el micro-inversor es de 1,20 [A] y según la sección 690-8 literal a de la NTC 2050 se debe ajustar la capacidad de corriente de los conductores, lo cual no debe ser inferior al 125% de la calculada. En este caso la capacidad de corriente de los conductores es:

$$I_C = 1,2 \cdot 1,25 = 1,5 \text{ A}$$

Teniendo en cuenta que la regulación de tensión debe ser menor a 1,5% según la norma NTC 2050, se selecciona el calibre del conductor. Donde 208 V es la tensión nominal en corriente alterna (AC) del micro-inversor ABB.

$$\Delta V = V \cdot 1,5\% = 208 \cdot 0,015 = 3,12 \text{ V}$$

La ecuación con la que se obtiene la sección transversal del conductor se deduce del criterio de caída de tensión:

$$S = \frac{L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta V} \quad (2.1)$$

Donde:

L: Longitud del conductor = 25 m

I: Capacidad de corriente del conductor = 1,5 A

ΔV : Caída de tensión = 3,12 V

Y: Conductividad del cobre a 70 °C = 46,82 m/Ω * mm²

La sección transversal del conductor del circuito de salida fotovoltaica es:

$$S = \frac{25 \cdot 1,5}{46,82 \cdot 3,12} = 0,25 \text{ mm}^2$$

Se escoge el conductor #14 AWG THW Cu cuya sección según la tabla 310-16 de la NTC 2550 es 2,08 mm², dado que las salidas de los conductores del micro-inversor son de este calibre.

3.3.3 Puesta a tierra

El diseño de la puesta a tierra se realiza según al Artículo 250-95 de la Norma NTC-2050 donde sugiere que el calibre del conductor del sistema de puesta a tierra no debe ser mayor al especificado en la Tabla 250-95 de la misma Norma. En este caso se seleccionó un conductor Cu 12 AWG THW el cual soporta una corriente nominal de 20 A.

3.3.4 Protecciones

Las protecciones para el sistema de generación fotovoltaica fueron seleccionadas según lo dispuesto en la norma NTC-2050. El objetivo de las protecciones instaladas es facilitar la maniobra del sistema, el aseguramiento de integridad de los equipos de generación y de medición y principalmente proteger la vida e integridad física de las de las personas.

Para la parte AC del sistema FV se consideraron tres tipos de protecciones eléctricas para este estudio: protecciones contra sobre-corrientes, contra sobretensiones y medios de desconexión. Para prevenir sobre-corrientes se instalaron interruptores automáticos – Interruptor tripolar (CHINT C6 y CHINT C10) y fusibles de 2 A, donde los interruptores cumplen la función de ser el medio de desconexión. Las sobretensiones se evitan por medio de limitadores de tensión.

No se instalaron protecciones en la parte DC del sistema fotovoltaico (panel – micro-inversor) porque en las instrucciones de instalación de los micro-inversores utilizados así lo indican. Sería necesaria la protección en caso que se instalen varios paneles FV en serie a un solo micro-inversor y la tensión superara los 100Vdc [29]

3.4 CUBIERTA VERDE – GRIPV #1

Debido a la gran concentración de edificaciones y vehículos de transporte, las ciudades se han convertido en lugares cada vez menos saludables. Los autos y acondicionadores de aire para el confort de las personas, consumen oxígeno y producen sustancias nocivas. Además las enormes superficies de hormigón y asfalto en las ciudades llevan a un sobrecalentamiento de la atmósfera llamando este efecto "isla de calor" [30]. Para mitigar el impacto que tiene el desarrollo humano en el medio ambiente se pueden instalar techos verdes en edificaciones por sus propiedades.

En el edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander se adecuaron dos terrazas con techo verde, en el quinto y sexto piso con el propósito de reducir la capacidad instalada del sistema de aires acondicionado, debido al nivel de aislamiento térmico que ofrece la cubierta verde. Este aislamiento térmico se logra con la sombra generada por el área foliar, la cantidad de calor almacenado en el sustrato y el calor que disipa por evaporación [17]. La terraza del sexto piso cuenta con un área de 440 m² de techo verde con tres especies vegetales de Sedum: Angelina, Blue y Sexangulare. En esta terraza se instalaron inicialmente tres módulos FV con el sistema micro-inversor ABB y a esta configuración se le llamó GRIPV #1. Posteriormente se instalaron otros diez paneles fotovoltaicos que constituyen el sistema GRIPV #2. Figura 14 muestra la instalación de uno de los soportes utilizados para la instalación de los paneles fotovoltaicos.

Figura 14. Fotografía de la zona de techo verde del sistema GRIPV #1



Las principales características de esta vegetación son: resistente a cambios bruscos de temperaturas, resistencia a las sequías, mínimo mantenimiento, poco requerimiento de irrigación y presenta buena apariencia. El techo verde de la terraza está conformado por una capa de vegetación, un suelo de cultivo y un conjunto de membranas protectoras [17], como se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Capas del sistema de cubierta verde



Fuente: Construible. Cubiertas verdes ligeras para edificios [En línea]. Construible, 2016. [Citado 14 febrero 2016]. Disponible en Internet: <https://www.construible.es/articulos/cubiertas-verdes-ligeras-para-edificios>

La mayoría de los estudios realizados con sistemas GRIPV se han llevado a cabo en clima templado, los cuales evidencian que esta integración permite que el techo verde mitigue ligeramente la temperatura de impacto (efecto negativo) en el panel fotovoltaico y en consecuencia haya un aumento de la potencia generada por los paneles fotovoltaicos. Además, los paneles fotovoltaicos pueden reducir el estrés por calor en la vegetación causados por la radiación solar directa [10], [11], [26], [27], [31].

3.4.1 Visualización del impacto térmico del techo verde en el panel FV

Los resultados anteriores pudieron evidenciarse también mediante un estudio paralelo a este trabajo de grado y que se presentó en el CIIMCA⁵, realizado en la terraza del sexto piso del edificio de Ingeniería Eléctrica de la UIS que se titula “Visualization the thermal impact of GRIPV system through thermographic images” en el cual se realizaron tomas con una cámara termográfica en dos paneles fotovoltaicos. La medición se realizó entre un panel sobre techo verde y un panel sobre techo negro. Donde se encontró una disminución de hasta de 5 °C de la temperatura del panel que estaba instalado sobre la cubierta verde, por lo tanto, la cubierta vegetal reduce la temperatura actuando como un sistema natural de enfriamiento disminuyendo la temperatura del aire circundante alrededor del panel fotovoltaico. En el ANEXO D se puede ver la evidencia de esta participación.

⁵ CIIMCA: Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Ciencias Agrícolas 2015. UPB Bucaramanga.

4. MONITORIZACIÓN REALIZADA A LOS SISTEMAS GRIPV # 1 Y GRIPV # 3

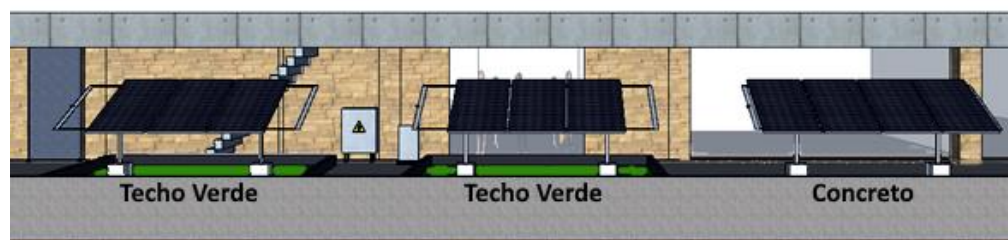
En este capítulo se describen las características básicas y el modo de conexión de los medidores, dataloggers y sensores implementados en los sistemas GRIPV #1 y GRIPV #3 y los diferentes procedimientos que se realizaron para la monitorización de las variables de interés.

Aunque inicialmente estaba prevista la monitorización del sistema GRIPV #1; dada la disponibilidad de dispositivos de instrumentación se procedió a realizar parte de la monitorización en el sistema GRIPV #3, que hace parte del proyecto de investigación titulado “Validación experimental del beneficio energético de la implementación de sistemas fotovoltaicos (FV) integrados con techos verdes para entornos tropicales con clima cálido”, financiado por COLCIENCIAS⁶ y se encuentra ubicado en el cuarto nivel de la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA GRIPV #3

El sistema GRIPV #3 está compuesto por 10 paneles FV Canadian Solar de 255 W, divididos en tres grupos, Configuración #1 (cuatro módulos FV), Configuración #2 (tres módulos FV) y Configuración #3 (tres módulos FV). Las configuraciones #2 y #3 están instaladas sobre una capa vegetal (techo verde Sedum), mientras que la Configuración #1 está instalada directamente sobre la placa de concreto de la Biblioteca del Campus Central de la UIS. Cada módulo FV se encuentra conectado a un micro-inversor Enphase M250, para un total de 10 micro-inversores. Las estructuras del sistema GRIPV #3 fueron diseñadas a partir del diseño realizado de las estructuras del sistema GRIPV #1 y por consiguiente presentan características mecánicas similares. La Figura 16 ilustra la instalación realizada del sistema GRIPV #3.

Figura 16. Ilustración del sistema GRIPV #3



⁶ COLCIENCIAS: Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación.

La recolección de datos de este sistema tiene diferencias con respecto a los sistemas GRIPV instalados en la terraza del sexto piso del edificio de Ingeniería Eléctrica, dada a la arquitectura del cuarto piso de biblioteca (ver Figura 16). Las paredes exteriores de la terraza de la biblioteca, reducen considerablemente el flujo de viento en sentido Norte-Sur, lo cual no ocurre en la terraza del edificio de Ingeniería Eléctrica. En el caso de la terraza de biblioteca, las paredes reducen que circulen las corrientes de aire lo cual modifica algunas condiciones de operación de los paneles fotovoltaicos, especialmente la temperatura alrededor de los paneles, lo cual puede afectar la generación de energía eléctrica.

4.2 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DE LAS VARIABLES ELÉCTRICAS DE LOS MICRO-INVERSORES

Cada uno de los sistemas de micro-inversión de corriente continua a corriente alterna instalados en los paneles fotovoltaicos (micro-inversores ABB en el sistema GRIPV #1 y micro-inversores Enphase en el sistema GRIPV #3) cuentan con un dispositivo registrador de datos, en el caso de los micro-inversores ABB es el CDD y en los micro-inversores Enphase es el Envoy-C.

4.2.1 Sistema de adquisición de datos CDD del micro-inversor ABB

La monitorización de los micro-inversores del sistema GRIPV #1 es posible gracias al CDD como se menciona en la sección 3.2.2. Este dispositivo se conecta a los micro-inversores con el protocolo IEEE 802.15.4 a través de una antena que le da un alcance máximo de 50 m.

El CDD está instalado en el cuarto técnico del quinto piso del edificio de Ingeniería Eléctrica. El sistema de suministro de energía eléctrica se realiza con un adaptador de 5 Vdc. La antena se instaló en la terraza del sexto piso y se conectó al sistema CDD con un cable coaxial RG-58 flexible y conectores SMA. La Figura 17 muestra el dispositivo CDD utilizado para registrar las variables eléctricas del micro-inversor ABB.

Figura 17. Dispositivo concentrador de datos (CDD)



Fuente: ABB. ABB micro invertir system [En línea]. ABB, 2016. [Citado 14 febrero 2016]. Disponible en Internet: https://library.e.abb.com/public/0ac164c3b03678c085257cbd0061a446/MICRO-CDD_BCD.00373_EN.pdf

4.2.2 Sistema de adquisición de datos Envoy-C del micro-inversor Enphase

El Envoy-C es un dispositivo que hace parte del sistema Enphase y corresponde al puerto de comunicaciones entre el usuario y los micro-inversores. Permite la monitorización y control de los micro-inversores a través de la web. También ofrece un chequeo sencillo de la operación del sistema mediante su pantalla LCD. La característica más importante que ofrece el Envoy-C es la del registro de datos de la energía convertida en corriente alterna por cada micro-inversor y la posibilidad de descargar estos datos. La Figura 18 muestra el dispositivo Envoy-C.

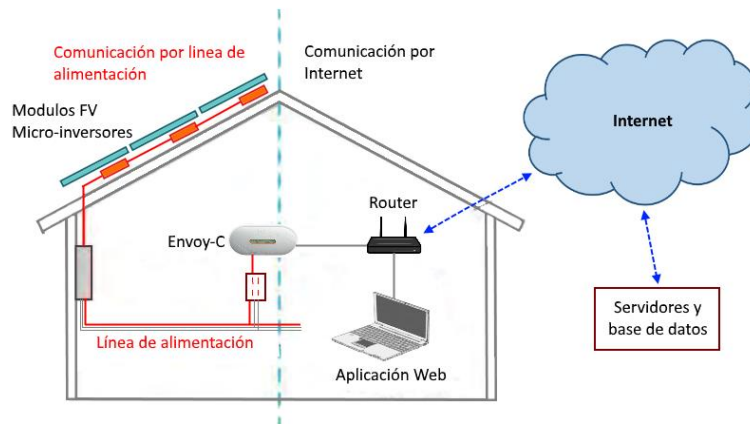
Figura 18. Envoy-C



Fuente: Enphase Energy. Envoy communications gateway [En línea]. Enphase Energy, 2016. [Citado 14 febrero 2016]. Disponible en Internet: http://enphase.com/sites/default/files/Envoy_Installation_and_Operation_NA.pdf

El sistema de comunicación utilizado en el Envoy-C es una red de área local (LAN) conectada al punto de acceso (*router*) por medio del puerto Ethernet. Este es solo otro *host* en la red al igual de un computador. Por otra parte, la fuente de alimentación del Envoy-C requiere que sea la línea de tensión proveniente de la salida de los micro-inversores, pues es el medio por el cual se realiza la comunicación con cada micro-inversor. Para mayor comprensión se ilustra el sistema de comunicación utilizado por el Envoy-C en la Figura 19.

Figura 19. Comunicación del Envoy-C



Fuente: Enphase Energy. Envoy communications gateway [En línea]. Enphase Energy, 2016. [Citado 14 febrero 2016]. Disponible en Internet: http://enphase.com/sites/default/files/Envoy_Installation_and_Operation_NA.pdf

4.3 DATALOGGERS

Para adquirir las diferentes variables de los sistemas GRIPV se utilizaron *dataloggers*. Las principales características consideradas de los *datalogger* son: compatibilidad con múltiples sensores, suficiente capacidad de almacenamiento de datos y autonomía con el fin de evitar el cableado para energizarlos.

Los dataloggers seleccionados son: el PACE XR5-SE-20mV de 8 canales y el OMEGA OM-CP-OCTTEMP2000, este último solo permite el uso de termocuplas.

Las figuras Figura 20 y Figura 21 muestran estos dos *dataloggers* y las tablas Tabla 4 y Tabla 5 muestran las características básicas de estos dispositivos.

Figura 20. Datalogger PACE



Fuente: Pace Scientific. XR5-SE Data Logger [En línea]. Pace Scientific, 2016. [Citado 14 febrero 2016]. Disponible en Internet: <http://www.pace-sci.com/data-loggers-xr5.htm>

Tabla 4. Especificaciones básicas del datalogger Pace.

PACE XR5-SE	
Dimensiones	124mm x 56,2mm x 32,5mm
Protección IP	IP50; IP65 (Caja protectora)
Interfaz de comunicación	Serial, 3 wire, EIA/TIA-562 (compatible con RS232) y 9600bps
Canales	8 canales de entradas analógicas con resolución de 12bits
Medida de temperatura	
Resolución	0,02°C a 25°C
	0,06°C o mejor desde -25 a 75°C
Exactitud	±0,15°C desde 10 a 40°C
	±0,3°C desde -40 a 80°C
Rangos de medida de tensión DC	
0-2.5V (Exactitud)	±0,15% F.S. ⁷ (10-40°C); ±0,20% F.S. (0-60°C)
0-5V (Exactitud)	±0,35% F.S. (10-40°C); ±0,40% F.S. (0-60°C)
Repetibilidad	±0,05% para cambios menores a 10°C de la temperatura ambiente.
Impedancia de entrada	>10MΩ
Rango de medida de resistencia (Resistencias de 2 conductores)	
Rango disponible	100Ω a 1.5MΩ (Medidas cerca de 30kΩ tienen mayor resolución)
Resolución a 30kΩ	0,1%
Exactitud a 30kΩ	±0,15%

Figura 21. Datalogger Omega



Fuente: Omega. 8 Channel Thermocouple Data Loggers [En línea]. Omega, 2016 [citado 14 febrero 2016]. Disponible en internet: <http://www.pace-sci.com/data-loggers-xr5.htm>

⁷ **F.S.:** Full Scale (Escala completa).

Tabla 5. Especificaciones básicas del datalogger Omega

OMEGA OM-CP-OCTTEMP2000	
Dimensiones	68mm x 183mm x 36mm
Memoria	500000 muestras por canal
Canales	8 canales, conector hembra mini y compensación de unión fría automática.
Tipos de termocuplas y rangos	Tipo J: -210 a 760°C Tipo K: -260 a 1370°C Tipo T: -260 a 400°C Tipo E: -260 a 980°C Tipo N: -260 a 1300°C
Exactitud	J, K, T, E, N: $\pm 0,5^\circ\text{C}$
Resolución	J, K, T, E, N: $0,1^\circ\text{C}$

4.4 MEDIDOR DE CORRIENTE CONTINUA DC-ACUDC 243

En el sistema GRIPV #3 se instalaron medidores de potencia y energía DC que también cuentan con la opción de registro de datos como los datalogger. El medidor AcuDC 243 es un dispositivo que monitoriza y registrar muestras de señales de tensión, corriente, potencia y energía de un sistema de corriente continua (DC) con una adecuada exactitud ($\pm 0,2\%$). Se integraron tres de estos medidores en el GRIPV #3 en el tablero de DC. Estos medidores se conectaron a los paneles 3, 6 y 9. Los módulos 6 y 9 están instalados sobre la capa verde.

En la Figura 22 se muestra el medidor y en la Tabla 6 se presentan las especificaciones básicas del mismo.

Figura 22. AcuDC 243



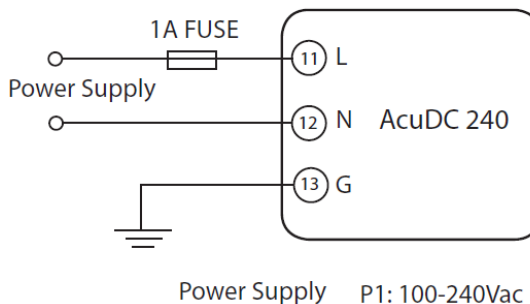
Fuente: Accuenergy. AcuDC 240 Series DC Power and Energy Meters [En línea]. Accuenergy, 2016 [citado 14 febrero 2016]. Disponible en internet: <https://www.accuenergy.com/files/acudc/AcuDC-240-DC-Power-Energy-Meter-Brochure.pdf>

Tabla 6. Especificaciones básicas del AcuDC 243

AcuDC 243	
Dimensiones	72mm x 72mm x 64,5mm
Temperatura de operación	-25°C ~ +70°C
Comunicación	
Tipo	RS485, medio duplex, ópticamente aislado
Protocolo	Modbus-RTU
Medida de tensión	
Rango de entrada	Entrada directa 0~1000V; Vía Sensor efecto Hall 0~ 1200V
Impedancia de entrada	2MΩ
Exactitud	0,2%
Medida de corriente	
Rango de entrada	0~±10A 0~±50000A vía shunt o sensor de efecto Hall
Shunt	50~100mV(programable)
Sensor de efecto Hall	0~±5V/0~±4V, 4~20mA/12mA±8mA
Exactitud	0,2%

La energía eléctrica requerida por los medidores AcuDC 243 es suministrada por la tensión de la red eléctrica utilizada en la biblioteca. En el tablero de DC junto a ellos se encuentran las protecciones contra posibles sobre cargas. La Figura 23 muestra cómo se conecta adecuadamente la fuente de alimentación al medidor con la protección requerida, que consiste en un fusible de 1A.

Figura 23. Cableado de la fuente de alimentación del AcuDC 240

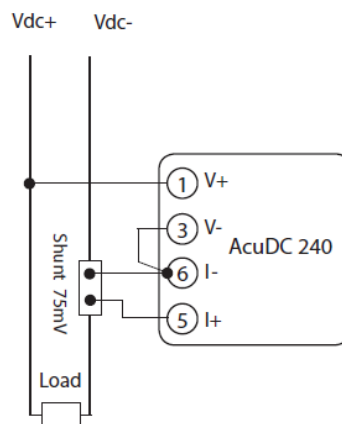


Fuente: Accuenergy. AcuDC 240 Series DC Power and Energy Meters [En línea]. Accuenergy, 2016 [citado 14 febrero 2016]. Disponible en internet: <https://www.accuenergy.com/files/acudc/AcuDC-240-DC-Power-Energy-Meter-Brochure.pdf>

Con respecto a la adquisición de la señal de tensión, se realiza directamente en los terminales de salida de los paneles FV, mientras que la de corriente se realiza por medio de una derivación Shunt de 75mV (si la tensión medida en la derivación es 0mV la corriente es 0 A y si es 75mV es 50 A) método propuesto por los ingenieros del proyecto de COLCIENCIAS.

En la Figura 24 muestra las conexiones realizadas para realizar la medición de corriente y tensión DC.

Figura 24. Conexión para la medida de corriente y tensión de la salida del panel fotovoltaico



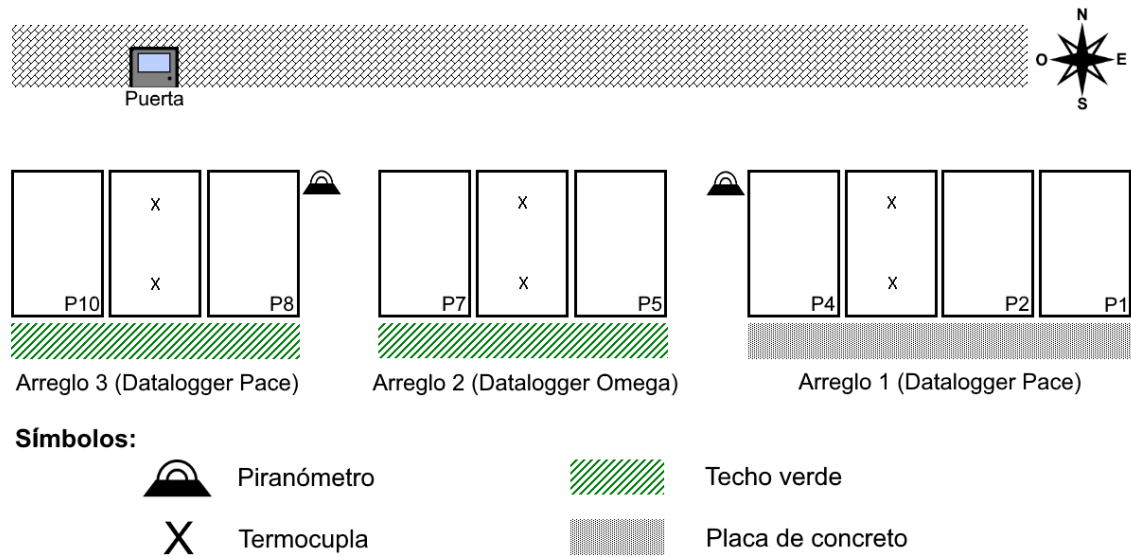
Fuente: Accuenergy. AcuDC 240 Series DC Power and Energy Meters [En línea]. Accuenergy, 2016 [citado 14 febrero 2016]. Disponible en internet: <https://www.accuenergy.com/files/acudc/AcuDC-240-DC-Power-Energy-Meter-Brochure.pdf>

4.5 DESCRIPCIÓN DE LOS SENSORES DE RADIACIÓN SOLAR Y TEMPERATURA

Se utilizan sensores para monitorizar variables como radiación solar y temperatura de los paneles. La radiación solar se mide con el piranómetro Kipp&Zonen SMP3 y la temperatura de cada panel en dos puntos con termocuplas Omega 5TC-TT-KI-36-2M.

La Figura 25 muestra la ubicación de estos sensores. Cada uno de los piranómetros se instaló entre las 3 configuraciones de paneles, el sensor de viento de baja velocidad ubicado en sentido Norte-Sur dispuesto así por la obstrucción al viento que ofrece la arquitectura del edificio y el otro en sentido Este-Oeste, y las termocuplas adheridas al panel en su parte posterior.

Figura 25. Ubicación espacial de los sensores de radiación solar y temperatura instalados en el GRIPV #3

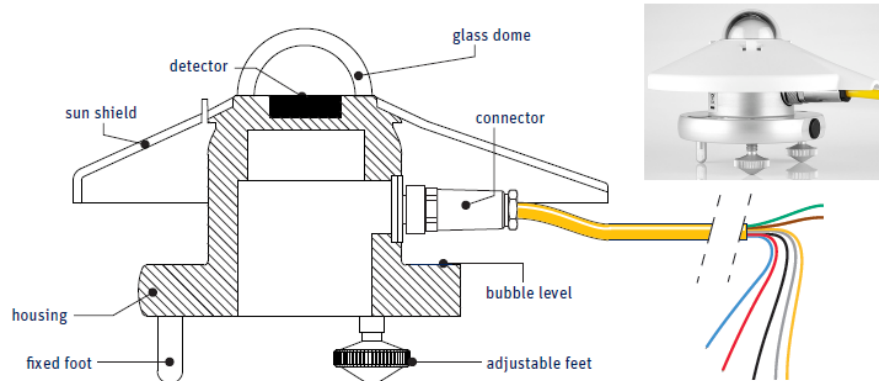


4.5.1 Piranómetro Kipp&Zonen SMP3

El SMP3 es un piranómetro de alta calidad diseñado para medir la irradiancia de onda corta en una superficie plana (flujo de radiación W/m^2) resultado de la suma de la radiación solar directa y de la radiación difusa incidente desde el hemisferio por arriba del instrumento.

Los piranómetros están instalados con la misma inclinación de los paneles FV y permiten medir la radiación solar promedio que perciben los módulos FV.

Figura 26. Partes del Piranómetro SMP3



Fuente: Kipp&Zonen. Instruction Manual. SMP series – Smart Pyranometer [En línea]. Kipp&Zonen, 2016 [citado 14 febrero 2016]. Disponible en internet: <http://www.kippzonen.com/Download/583/Manual-SMP-series-Smart-Pyranometers>

En la Figura 26 se observan las diferentes partes del piranómetro, el cual tiene las siguientes características:

- Salida analógica: 0 – 1 V
- Rango de salida analógica: -200 a 2000 W/m²
- Tiempo de respuesta (63%): <1,5 s
- Tiempo de respuesta (95%): <12 s

Cada piranómetro se conecta a uno de los datalogger PACE en una de las entradas analógicas por medio de cables de color verde y marrón. Adicionalmente se alimenta con una tensión de 12 VDC (provenientes de un adaptador de 12 V ubicado en el tablero de DC) por medio de los cables color blanco y negro. La Tabla 7 muestra las funciones de los cables según su color.

Tabla 7. Cables por color del piranómetro SMP3

CABLEADO	
	Salida analógica V+
	Tierra de salida analógica V-
Blanco	Fuente de alimentación 5 – 30 VDC (Recomendado 12 V)
	Tierra de fuente de alimentación
	Ninguna función
Otros	Para comunicación Modbus RS-485

Dado que la salida analógica es de 0 a 1 V, se debe configurar el canal del datalogger PACE en donde se conecta el piranómetro para obtener la medida real de radiación solar, con la siguiente ecuación [32]:

$$E_{Solar} = (V * 2200) - 200 \quad (3.1)$$

Donde V es la salida analógica y E_{Solar} es la radiación incidente en W/m^2 .

4.5.2 Termocuplas

Las termocuplas utilizadas tiene calibración tipo K y una tolerancia de 0,75% cuando el rango de temperatura está entre 0 y 1250 °C, son de 2 m de largo y calibre 36 AWG. Son compatibles con el datalogger OMEGA ya que son del mismo fabricante.

La conexión es sencilla, son termocuplas de dos conductores que se conectan al datalogger OMEGA por medio de unos conectores macho, y al datalogger PACE en cualquiera de sus canales analógicos.

4.6 TRATAMIENTO DE ALTURAS DEL PANEL FV SOBRE EL TECHO VERDE

Un aspecto que se considera importante en la experimentación, es establecer el efecto que tiene la altura a la cual se instala el panel sobre el techo verde en la generación de energía eléctrica. Para ello, en el proceso para la adquisición de los datos experimentales se implementaron varios casos, en los cuales se ajustaron las alturas de las configuraciones #2 y #3 manualmente. Dichas alturas se mantuvieron por varios días con el fin obtener una buena cantidad de datos. La Tabla 8 muestra la información detallada de los casos analizados, donde se indican los periodos de adquisición de datos y las alturas de cada configuración teniendo en cuenta que la altura que se menciona es la que comprendida entre la capa verde y la altura media del panel. El registro de datos en el GRIPV #3 se hizo cada cinco minutos y los del GRIPV #1 cada minuto.

Tabla 8. Casos del experimento en GRIPV #3

CASO	ALTURAS [M]		FECHAS	DÍAS
	Config. #2	Config. #3		
GRIPV #3				
I	1,00	1,25	Nov. 24 – Nov. 26	3
II	1,00	0,75	Nov. 30 – Dic. 4	5
GRIPV #1	Panel 1	Panel 3		
I	0,50	0,75	Feb. 17 – Feb. 19	3
II	0,25	0,75	Feb. 25 – Feb. 27	3

Los casos I y II del GRIPV #1 son complementarios a los casos del GRIPV #3. Los datos de las variables en corriente alterna de los casos I y II del GRIPV #3 se obtienen de la información registrada por los micro-inversores Enphase. En el GRIPV #1 se realizó la monitorización de la potencia a la salida de los micro-inversores ABB.

Durante la adquisición de los datos en el GRIPV #1, se controló el flujo de viento en sentido norte-sur por medio de una lana mineral, con ella se cubrieron 4 m de la baranda de la terraza, adicionalmente se cubrió también con lana mineral todo el soporte de los tres paneles FV con el fin de reducir el efecto que tiene el viento en la temperatura de trabajo de los paneles FV. En la Figura 27 se muestra la disposición que se utilizó de estas lanas minerales para mitigar el efecto del viento.

Figura 27. Mecanismo para el control del viento en GRIPV #1



5. ANÁLISIS DE LOS DATOS ADQUIRIDOS EN LA EXPERIMENTACIÓN REALIZADA

Para el análisis de los datos adquiridos durante la experimentación se desarrolló un aplicativo utilizando la herramienta GUIDE de MATLAB.

En este capítulo se describe el aplicativo utilizado y se analiza el comportamiento de las diferentes variables que influyen en el comportamiento de los paneles fotovoltaicos, a partir de los casos que se implementaron en el proceso de experimentación.

Para el análisis de los resultados obtenidos se debe tener en cuenta la incertidumbre de cada instrumento de medición, dado que la incertidumbre es un parámetro inseparable del resultado de una medición y refleja la carencia de un conocimiento exacto del valor del mensurando [33]. Todos los cálculos de las incertidumbres mencionadas a continuación fueron desarrollados en el ANEXO C.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL APLICATIVO DESARROLLADO

La herramienta GUIDE es un entorno de programación visual que está disponible en MATLAB para realizar y ejecutar sentencias que necesitan de la edición constante de variables. La aplicación GUIDE consta de dos archivos .m y .fig., el archivo .m contiene el código de todos los elementos gráficos de la aplicación y el archivo .fig contiene todos los elementos gráficos.

Utilizando esta herramienta se desarrolló una interfaz gráfica de usuario para el análisis de los datos adquiridos durante la experimentación y que permite comparar el comportamiento de las variables de cada uno de los casos y así poder establecer el efecto de la cubierta vegetal en las diferentes alturas de los módulos fotovoltaicos en la generación de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos.

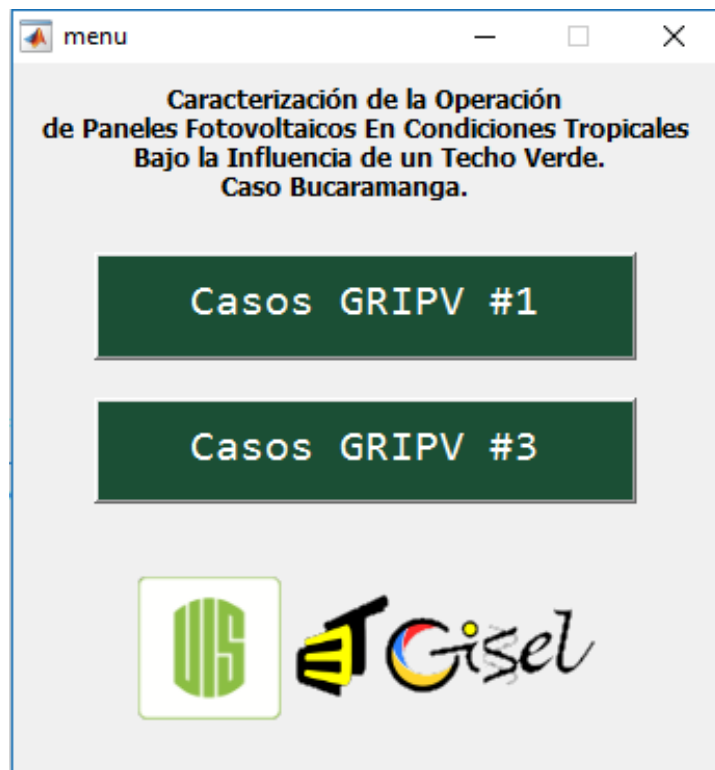
La operación del GUI⁸ del aplicativo es sencilla. Se debe ejecutar el archivo principal nombrado menu.m, el cual se abre un pequeño menú que permite seleccionar entre “Casos GRIPV #1” y “Casos GRIPV #3”.

⁸ GUI: Graphical User Interface - Interfaz gráfica de usuario.

Posteriormente, en la nueva ventana que se ejecuta se debe escoger uno de los casos disponibles para graficar en un mismo eje coordenado las dos curvas de la variable deseada a las diferentes alturas consideradas en cada una de las configuraciones. La Figura 28 muestra como se ve el menú principal del aplicativo.

Para el caso del GRIPV #1 solo se debe escoger el caso ya que solo se tomaron datos de potencia generada por el panel y medida en corriente alterna a la salida de los micro-inversores ABB.

Figura 28. Menú principal del aplicativo

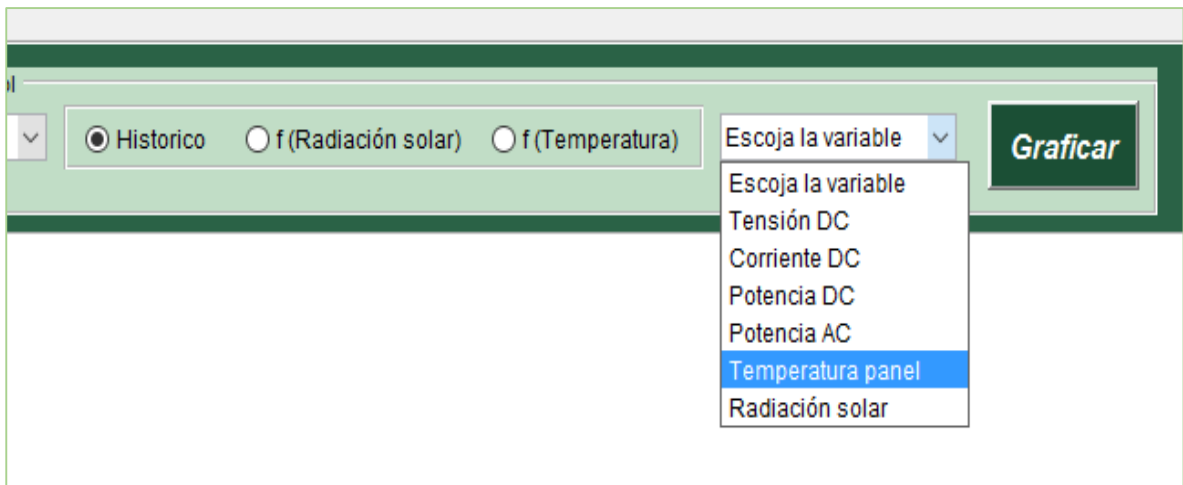


Para ilustrar el uso del aplicativo, en la Figura 29 se señalan las partes que componen el GUI para la visualización y análisis gráfico de datos del GRIPV #3 y en la Figura 30 se pueden observar las diferentes variables que se monitorizaron en el GRIPV #3 y que están disponibles para visualización en el aplicativo. En primera instancia está el panel de control, encerrado en el recuadro 1, allí se debe seleccionar el caso que se desea analizar, el tipo de gráfica y la variable a visualizar en el recuadro 3. El recuadro 2 muestra la energía total generada por cada panel y en el recuadro 4 están las herramientas para el acondicionamiento de las curvas, entre ellas mostrar la información de puntos específicos, hacer Zoom y mover la curva. En el ANEXO B se explica con más detalle el aplicativo.

Figura 29. Ventana para la visualización de variables del GRIPV #3

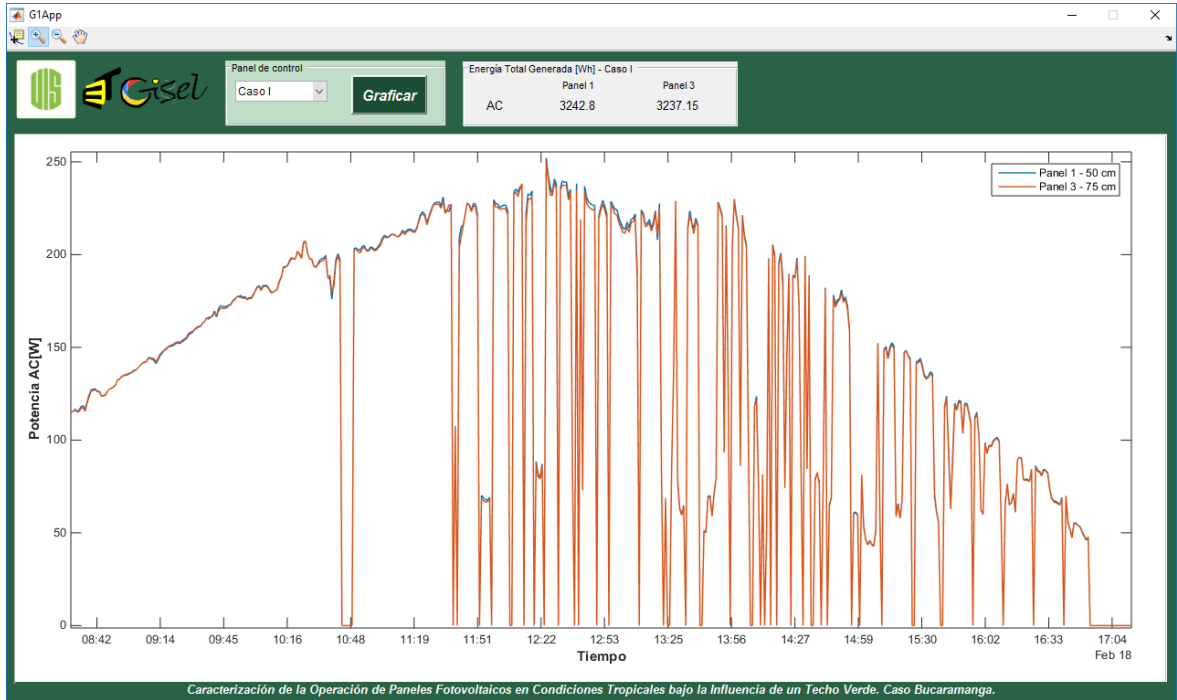


Figura 30. Variables disponibles en el GRIPV #3.



El aplicativo que corresponde a los casos el GRIPV #1 es similar y se puede ver en la Figura 31, la única diferencia radica en el panel de control, donde se selecciona el caso que se desea visualizar.

Figura 31. Ventana para la visualización de variables del GRIPV #1



5.2 ANALISIS DE CASOS EN EL GRIPV #3

El análisis de los casos tratados en el GRIPV #3 se realizó a partir de las gráficas obtenidas por medio del aplicativo, con ayudas como el cursor de datos y la energía total generada, disponibles en el aplicativo. También los datos numéricos se usaron para analizar el comportamiento de las variables. Las alturas de los casos mencionados en esta sección se miden desde el techo verde.

5.2.1 Caso I – Panel 6 (100 cm) - Panel 9 (125 cm)

En este caso hay un análisis de todas las variables medidas: Radiación solar promedio, temperatura promedio, potencia generada por los paneles (DC) y potencia a la salida de los micro-inversores (AC).

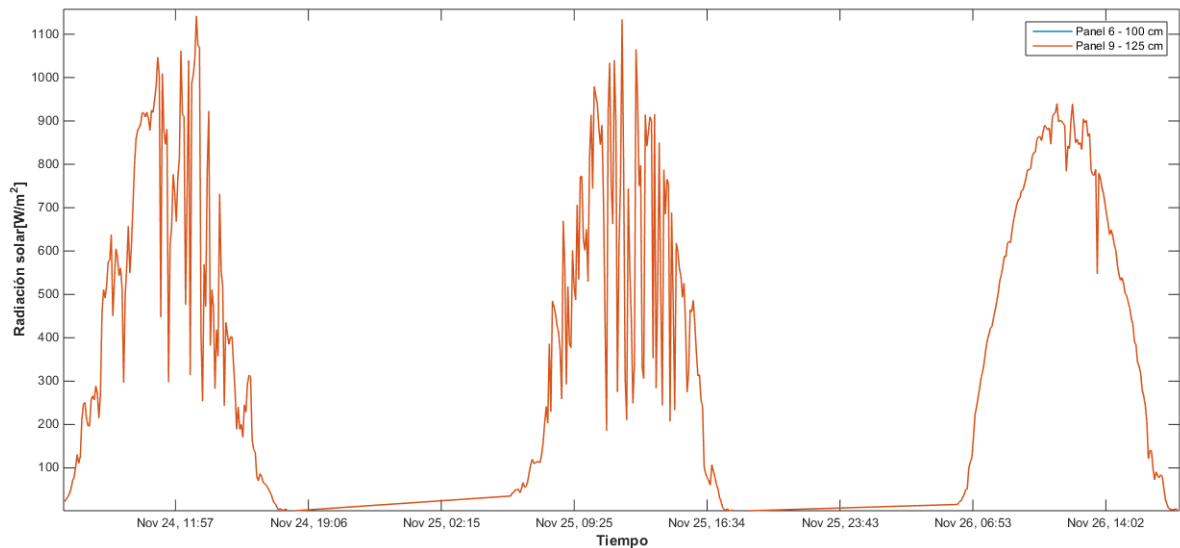
Radiación solar. Se visualiza que durante los dos primeros días de medición la radiación solar tuvo continuos cambios. Factores externos como nubosidad o en ocasiones las lluvias hacen que se presente este tipo de comportamiento. Aunque esto afecta directamente a la generación de energía eléctrica con los paneles

fotovoltaicos, este factor no es controlable. En el tercer día la radiación solar medida tuvo un comportamiento más estable. La Figura 32. Gráfica de radiación solar medida durante el Caso I – GRIPV #3 muestra el comportamiento de la radiación solar durante todo el tiempo que se realizó la experimentación del caso I.

Durante el caso I se puede ver por medio del aplicativo, que la radiación solar máxima medida es $1142,45 \pm 22,95 \text{ W/m}^2$ y la mínima es $185,45 \pm 3,72 \text{ W/m}^2$ los días 24-Nov-15 a la 1:05 PM y 25-Nov-15 a las 11:10 AM respectivamente. Estos valores se toman dentro de la franja donde la radiación solar puede ser máxima que es de 10:00 AM hasta las 3:00 PM dado que si no se hace esta consideración la radiación mínima evidentemente sería cero.

Por otra parte, se puede decir que las horas del día donde se puede generar energía eléctrica es desde las 6:00 AM hasta las 5:20 PM, teniendo en cuenta que por medio del aplicativo se encuentra que la radiación mínima con la cual se genera energía eléctrica es $7,50 \pm 0,15 \text{ W/m}^2$.

Figura 32. Gráfica de radiación solar medida durante el Caso I – GRIPV #3

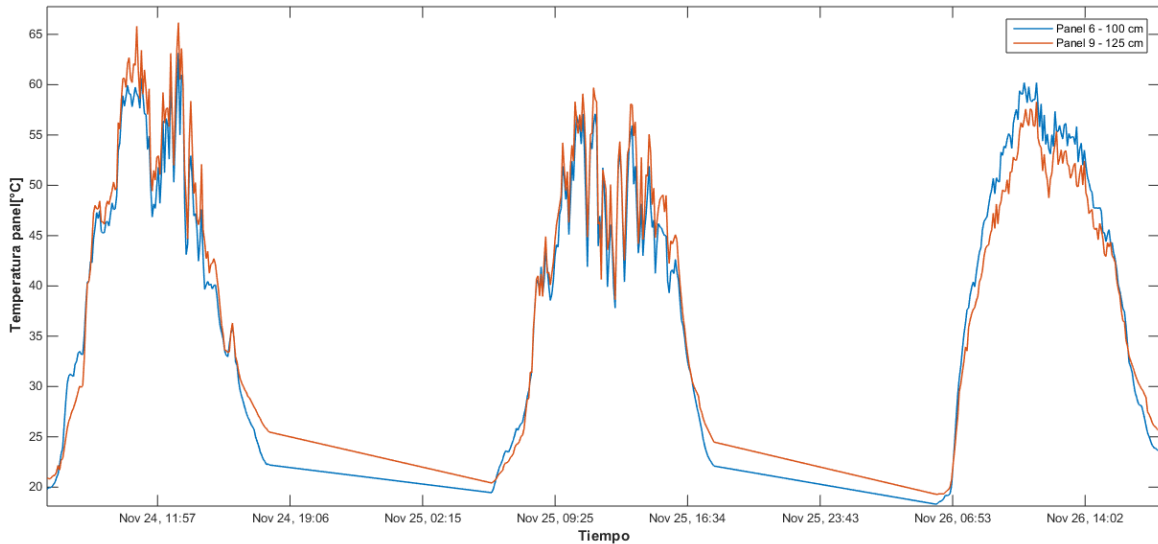


Temperatura medida. La temperatura estimada del Panel 9 se mantuvo por encima de la del Panel 6 durante las mediciones de los dos primeros días, por el contrario, en el tercer día, la temperatura medida en el Panel 6 fue mayor que la del Panel 9. Las gráficas no presentan un comportamiento esperado dado que la variabilidad de la radiación solar producida por factores externos como la nubosidad, lluvias, etc, hace que la temperatura no alcance a estabilizarse cuando se presenta otro cambio, como ocurrió en el primer y segundo día de mediciones, en contraste, en el tercer

día, no hubo cambios abruptos de radiación solar y por lo tanto las gráficas de temperatura del tercer día son más estables.

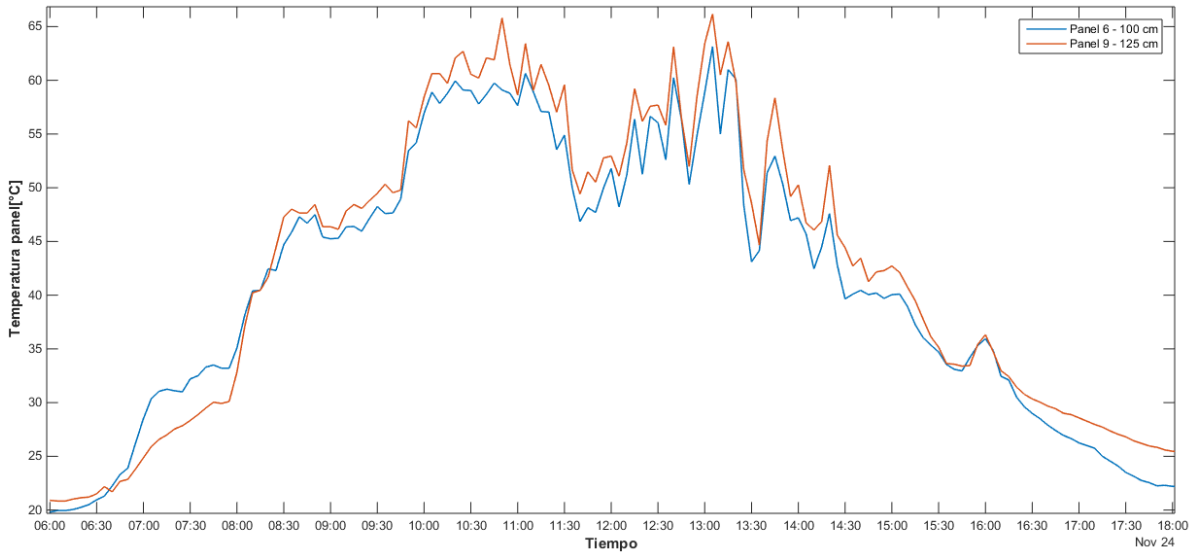
La Figura 33 muestra el comportamiento de la temperatura en los dos paneles durante los tres días del experimento.

Figura 33. Gráfica de la temperatura estimada durante el Caso I – GRIPV #3



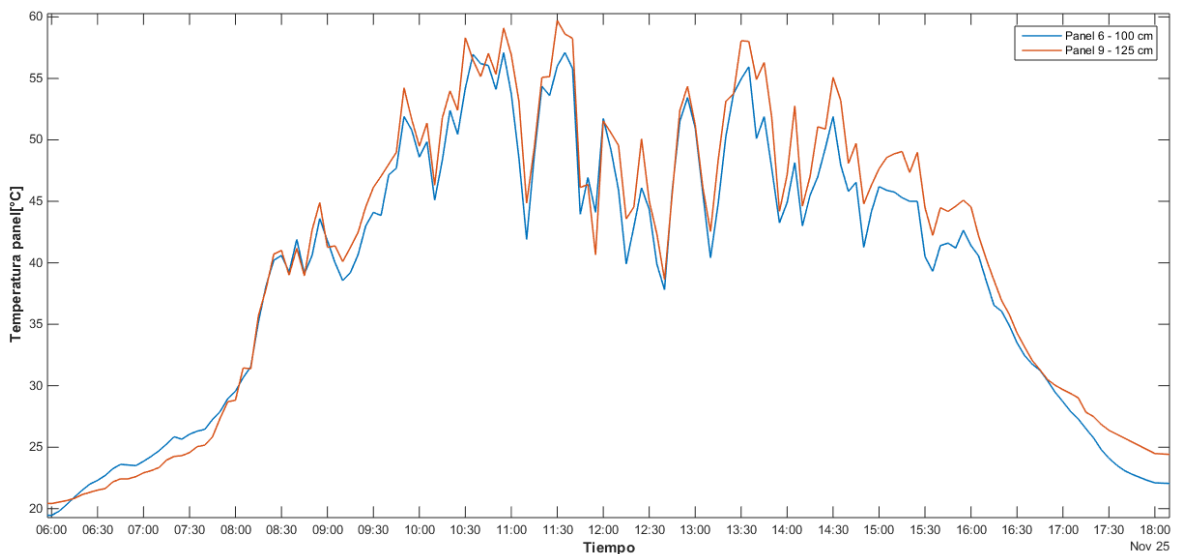
- **Día 1:** La diferencia de temperatura entre los paneles 6 y 9 no es significativa. Esta diferencia varía entre $0 \pm 1,01$ °C y $7,00 \pm 1,41$ °C. Durante este día, la mayor parte del tiempo la temperatura del Panel 9 estuvo por encima que la del Panel 6. Las temperaturas más altas que se registraron en los paneles 9 y 6 fueron $66,17 \pm 0,58$ °C y $63,15 \pm 0,69$ °C respectivamente. La Figura 34 muestra el comportamiento de las temperaturas de los dos paneles durante el primer día del experimento.

Figura 34. Gráfica de temperatura promedio en el Día 1 – Caso I



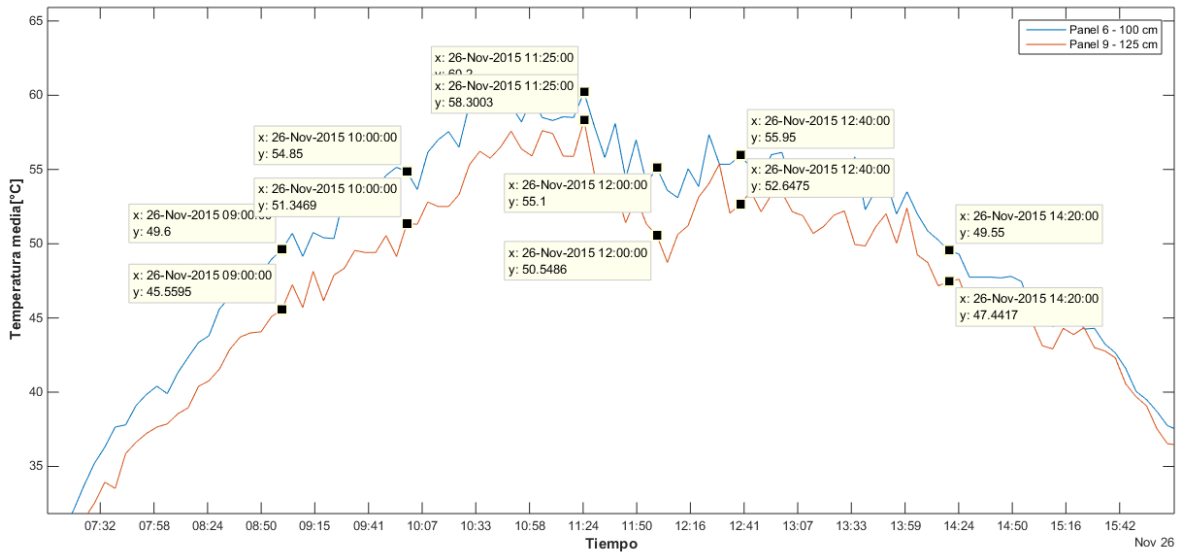
- **Día 2:** La diferencia de la temperatura entre los paneles 6 y 9 nuevamente no es grande, en esta ocasión la diferencia varió entre $0,5\pm 1,18$ °C hasta aproximadamente $4,00\pm 1,10$ °C. Durante este día de toma de datos, la mayor parte del tiempo la temperatura del Panel 9 estuvo por encima de la del Panel 6. Las temperaturas más altas que registraron en el Panel 9 y Panel 6 fueron $59,71\pm 0,53$ °C y $57,10\pm 0,65$ °C respectivamente. La Figura 35 muestra el comportamiento de las temperaturas de los dos paneles durante el segundo día del experimento.

Figura 35. Gráfica de temperatura promedio en el Día 2 – Caso I



- **Día 3:** En esta día, la diferencia de temperatura entre los paneles 6 y 9 presento un comportamiento diferente como se puede visualizar en la Figura 36, donde se muestra que durante todo el día la temperatura del Panel 6 fue mayor a la del Panel 9. Esta diferencia varió entre $1,00 \pm 1,13$ °C y $5,00 \pm 1,16$ °C. La temperatura más alta que se registró del Panel 9 y Panel 6 fueron $58,00 \pm 0,52$ °C y $59,05 \pm 0,66$ °C respectivamente. La Figura 36 muestra el comportamiento de las temperaturas de los dos paneles durante el tercer día del experimento.

Figura 36. Gráfica de temperatura promedio en el Día 3 – Caso I



Potencia y energía generada en corriente continua (DC) y corriente alterna (AC). Considerando la relación entre la temperatura del panel y la potencia generada por este, se esperaba obtener resultados que constarán que sí se reduce la temperatura de un panel, la potencia generada por éste aumentara o al contrario. En este experimento, los resultados obtenidos no muestran esta tendencia. Hay factores como el viento circundante, la variación permanente de la radiación solar entre otros que modifican las condiciones de operación del panel. Las Figura 37 y Figura 38 muestran el comportamiento de las potencias en corriente continua (DC) y corriente alterna (AC) del Caso I.

En el primer día de esta experimentación, desde las 6 AM hasta las 8:50 AM, se observa un incremento tanto de la potencia generada por el panel (DC) como la obtenida a la salida del micro-inversor (AC) del Panel 6, lo cual se debe a que en esa franja se terminó el ajuste de la altura de dicho panel sobre el techo verde. Posterior a ese ajuste, la potencia generada por el panel y la medida a la salida del micro-inversor del Panel 9 son mayores a las del Panel 6 durante los tres días. Aun

cuando se esperaba que durante los dos primeros días la potencia del Panel 6 fuera superior a la del Panel 9 teniendo en cuenta las temperaturas estimadas estos dos días no se dio tal efecto. Un aspecto a considerar durante estos dos días, es que la radiación solar vario permanentemente como se muestra en la Figura 32, por la presencia de nubes que hacían que en algunos momentos la radiación se redujera intempestivamente, y luego empezará nuevamente a incrementarse, esto afecta el comportamiento de los paneles. En cambio, en el tercer día la radiación no presento tantos cambios intempestivos (la nubosidad en la zona fue mínima), su tendencia fue ir creciendo durante la mañana hasta alcanzar su máximo valor de $940,3 \pm 18,89$ W/m² a las 11:25 a.m., para luego empezar a decrecer.

Figura 37. Gráfica de la potencia generada por los paneles (DC) durante el Caso I – GRIPV #3

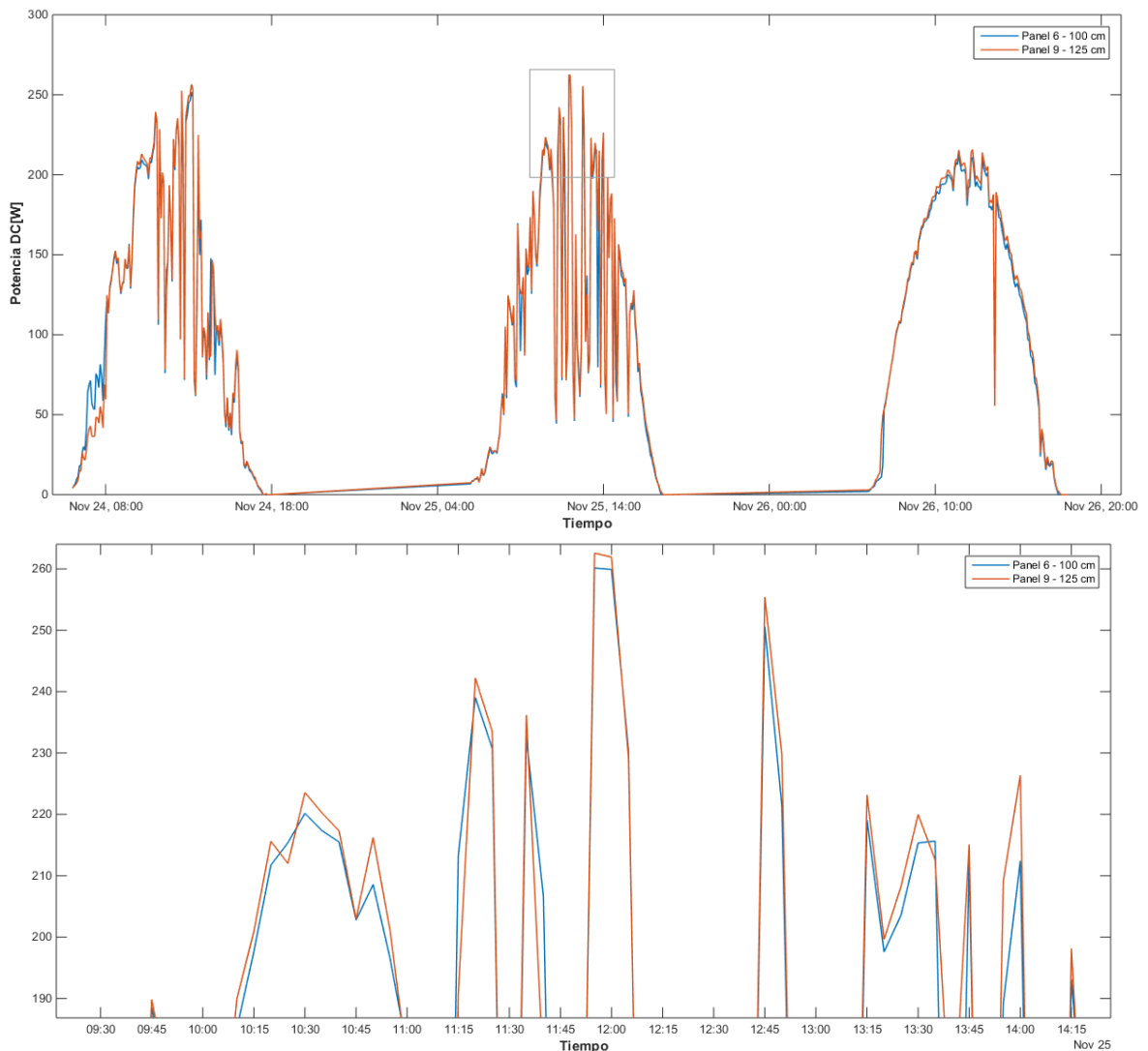
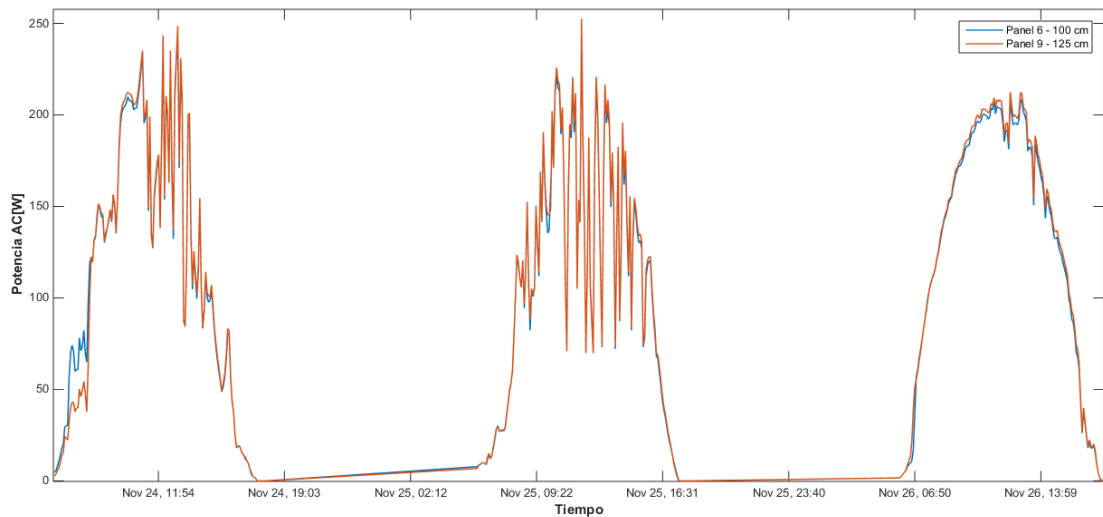


Figura 38. Gráfica de potencia a la salida de los micro-inversores (AC) durante el Caso I – GRIPV #3



Con los datos de la potencia estimada tanto en corriente continua como en corriente alterna, se obtiene la energía eléctrica generada por los paneles (DC) y la energía eléctrica entregada por los micro-inversores (AC). Dado que la energía se obtiene como la integral de la potencia con respecto al tiempo y en esta experimentación se tiene las muestras de la potencia activa estimada cada 5 min, se redefine la expresión de la energía a una sumatoria de ΔE , donde cada ΔE se obtiene como la potencia estimada multiplicada por el tiempo entre muestras que en esta experimentación es de 5 min. De acuerdo con esto, se obtiene la energía generada.

La energía total generada por los paneles (DC) 6 y 9 fue de $4,027 \pm 0,011$ kWh y $4,078 \pm 0,011$ kWh respectivamente y la energía total generada a la salida de los micro-inversores (AC) 6 y 9 fue de $4,050 \pm 0,143$ kWh y $4,081 \pm 0,144$ kWh respectivamente. Las diferencias de estos datos son $0,051 \pm 0,022$ kWh para la energía generada por los paneles y $0,031 \pm 0,287$ kWh para la energía generada por los micro-inversores.

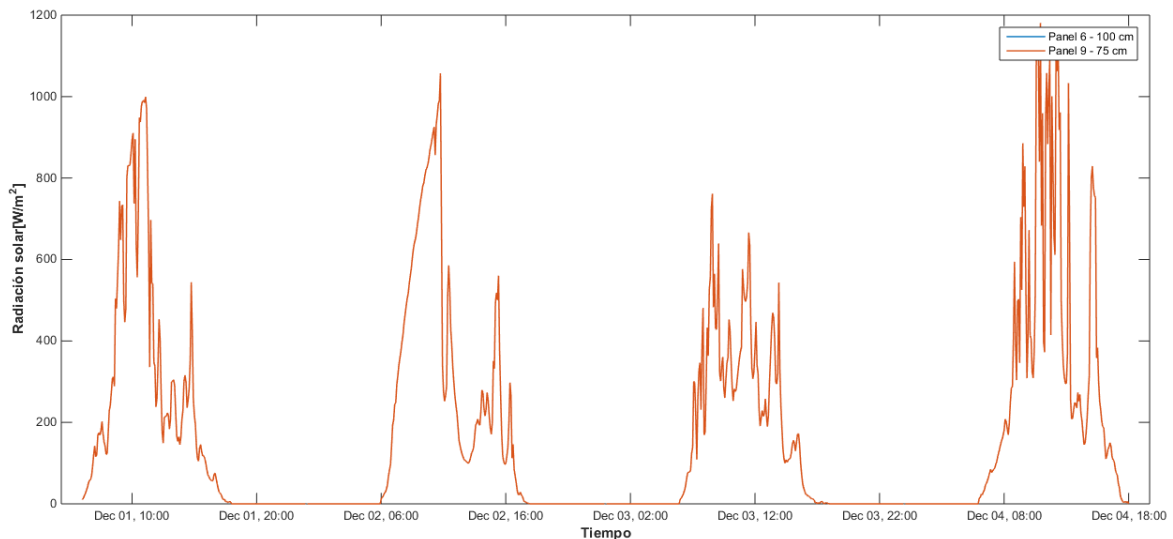
Al comparar las estimaciones de las potencias generada por el panel (DC) y a la salida del micro-inversor (AC) (sin considerar las incertidumbres) pareciera que fuera mayor la potencia a la salida del micro-inversor. Esto se debe a que la incertidumbre de la medida potencia del micro-inversor es 12,5 veces mayor que la incertidumbre de la medida de potencia del medidor de DC y como la eficiencia del micro-inversor es elevada, la pequeña diferencia entre estas dos potencias es menor que la incertidumbre del micro-inversor, lo cual lleva a tener valores estimados de potencia mayores en la salida del micro-inversor.

Para el Caso I se considera que la influencia de la altura sobre el techo verde en el comportamiento de los paneles es insignificante, ya que las potencias eléctricas tanto en corriente continua como en corriente alterna del panel 6 son menores a las del panel 9 y tal comportamiento no se puede atribuir al techo verde, debido a que la temperatura de trabajo de los dos paneles es similar como se observa en las figuras 36 a 38 y si probablemente a el viento.

5.2.2 Caso II – Panel 6 (100 cm) - Panel 9 (75 cm)

En este caso se realizaron mediciones de radiación solar y las potencias a la salida de los micro-inversores (AC) y la potencia generada por los paneles (DC), debido al ajuste en el datalogger OMEGA que se había mencionado en la sección 4.6 que no permitió medir la variación de la temperatura en el Panel 6. La Figura 39 muestra el comportamiento de la radiación solar durante todo el tiempo que se realizó la experimentación del caso II.

Figura 39. Gráfica de radiación solar medida durante el Caso II – GRIPV #3



Potencia y energía generada en corriente continua (DC) y corriente alterna (AC). En las Figura 40 y Figura 41 se muestra como varían las potencias DC y AC en los dos paneles. En ellas se aprecia que el comportamiento de la potencia generada por los paneles (DC) y la potencia a la salida de los micro-inversores (AC) en cada uno de los módulos es similar. Es decir que el cambio de la altura del Panel 9 a 0,75 cm no modifica substancialmente el comportamiento del panel en comparación con los resultados del Caso I.

La energía total generada por los paneles (DC) 6 y 9 fue de $3,436 \pm 0,097$ kWh y $3,466 \pm 0,098$ kWh respectivamente y la energía total generada a la salida de los micro-inversores (AC) 6 y 9 fue de $3,473 \pm 0,123$ kWh y $3,499 \pm 0,124$ kWh respectivamente. Las diferencias de estos datos son $0,03 \pm 0,195$ kWh para la energía generada por los paneles y $0,026 \pm 0,243$ kWh para la energía generada por los micro-inversores.

Nuevamente, al comparar las estimaciones de las potencias generada por el panel (DC) y a la salida del micro-inversor (AC) (sin considerar las incertidumbres) pareciera que fuera mayor la potencia a la salida del micro-inversor, lo cual se debe al hecho que la medida de potencia en corriente alterna tiene una incertidumbre del orden de 12,5 veces a la incertidumbre del equipo con el que se realizó la medida de la potencia en corriente continua.

Figura 40. Gráfica de la potencia eléctrica generada por los paneles (DC) durante el Caso II – GRIPV #3

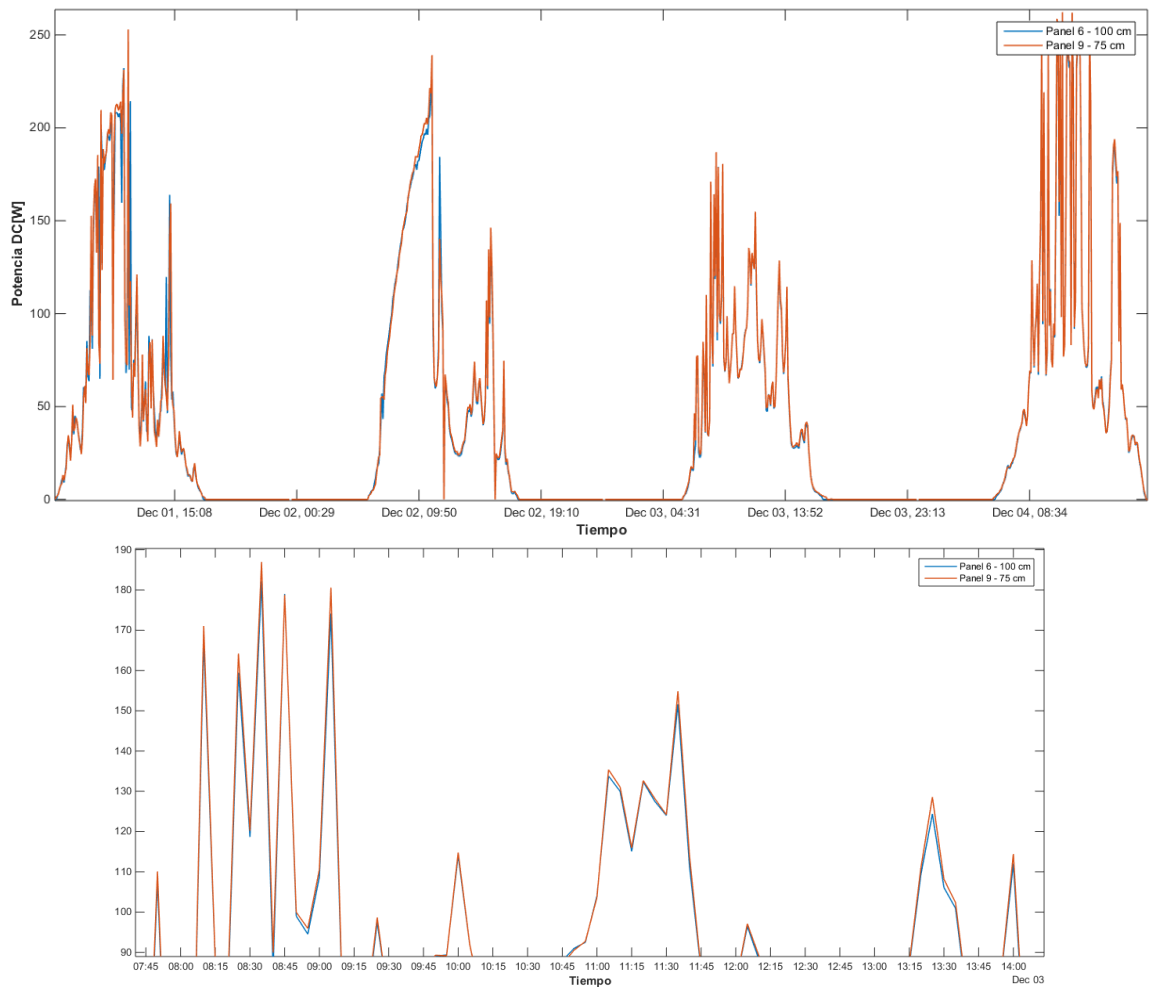
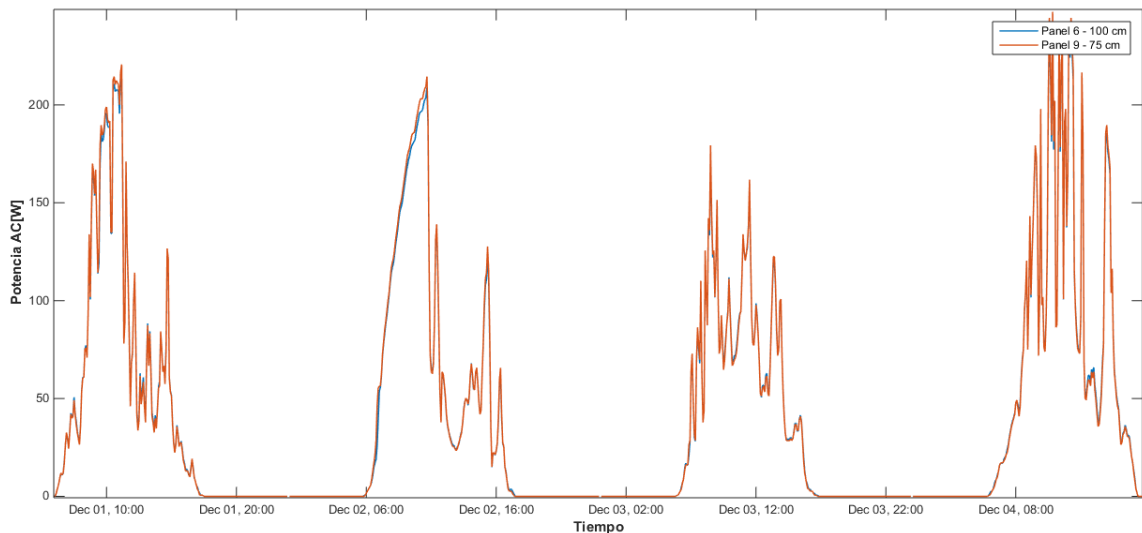


Figura 41. Gráfica de potencia eléctrica a la salida de los micro-inversores (AC) durante el Caso II – GRIPV #3



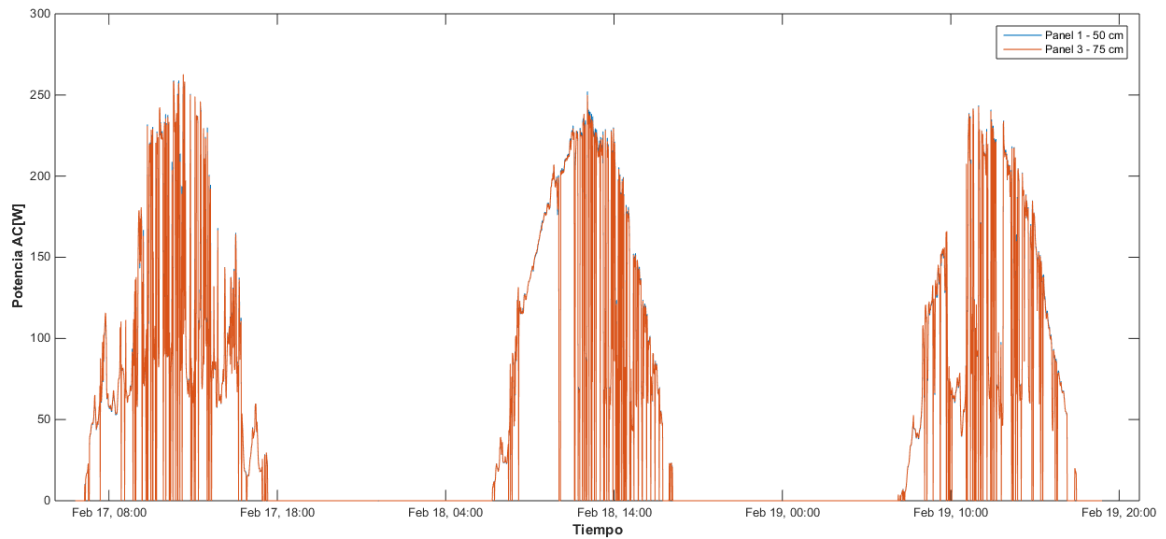
5.3 ANALISIS DE CASOS EN GRIPV #1

El análisis de los casos en este sistema corresponde a la comparación del comportamiento la potencia eléctrica a la salida de los micro-inversores (AC) a las alturas de 25 cm, 50 cm y 75 cm. Se hizo registro de potencia AC debido a que los dos equipos de medición de potencia eléctrica en corriente continua (DC) se instalaron en los GRIPV #2 y GRIPV#3. Las alturas de los casos mencionados en esta sección se miden desde el techo verde.

5.3.1 Caso I – Panel 1 (50 cm) – Panel 3 (75 cm)

Se observa que los datos de potencia eléctrica varían abruptamente como se observa en las Figura 42 y Figura 43. La energía total generada a la salida de los micro-inversores (AC) 1 y 3 fue de $3,242 \pm 0,229$ kWh y $3,237 \pm 0,229$ kWh respectivamente. Los datos obtenidos de la energía eléctrica generada por los dos paneles muestran que éstos son similares. El Panel 1 genera 0,17% ($0,005 \pm 0,458$ kWh) más energía eléctrica que el Panel 3 durante los tres días que se realizaron las mediciones. No se puede afirmar que los valores obtenidos de energía generada por los paneles son precisos dado que la incertidumbre los los micro-inversores es muy grande ($\pm 5\%$) por lo que no se puede realizar un análisis profundo.

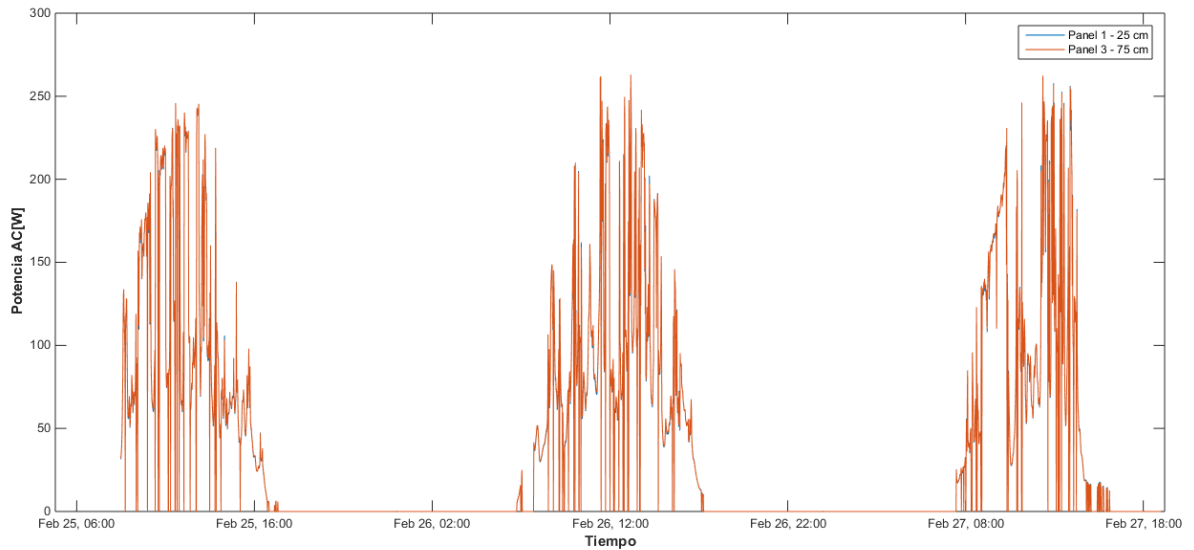
Figura 42. Gráfica de potencia eléctrica AC durante el Caso I – GRIPV #1



5.3.2 Caso II – Panel 1 (25 cm) – Panel 3 (75 cm)

La energía total generada a la salida de los micro-inversores (AC) 1 y 3 fue de $2,447 \pm 0,175$ y $2,462 \pm 0,174$ kWh respectivamente. Los datos obtenidos de la energía eléctrica generada por los dos paneles muestran que éstos son similares, pero en este caso el Panel 3 genera aproximadamente 0,58% ($0,015 \pm 0,349$ kWh) más energía eléctrica que el Panel 1 durante los tres días de mediciones. En este caso la configuración de techo verde con la altura de instalación de los paneles FV a 25 cm presenta un efecto negativo en la generación dado que la potencia es menor en comparación a la otra altura. No se puede afirmar que los valores obtenidos de energía generada por los paneles son precisos dado que la incertidumbre de los micro-inversores es muy grande ($\pm 5\%$) por lo que no se puede realizar un análisis detallado.

Figura 43. Gráfica de Potencia AC durante el Caso II – GRIPV #1



5.4 TABLA DE RESULTADOS

La Figura 44 resume los resultados obtenidos en los casos de cada uno de los sistemas GRIPV #1 y GRIPV #3.

Figura 44. Tabla de resultados.

VARIABLES	GRIPV # 1				GRIPV # 3			
	CASO I		CASO II		CASO I		CASO II	
	P1	P3	P1	P3	P6	P9	P6	P9
Rad. solar máxima	-	-	-	-	1142,45 ± 22,95 W/m ²		-	-
Rad. solar mínima	-	-	-	-	185,45 ± 3,72 W/m ²		-	-
Temp. máxima	-	-	-	-	63,15 ± 0,69 °C	66,17 ± 0,58 °C	-	-
Energía total (DC)	-	-	-	-	4,027 ± 0,011 kWh	4,078 ± 0,011 kWh	3,436 ± 0,097 kWh	3,466 ± 0,098 kWh
Energía total (AC)	3,242 ± 0,229 kWh	3,237 ± 0,229 kWh	2,447 ± 0,175 kWh	2,462 ± 0,174 kWh	4,050 ± 0,143 kWh	4,081 ± 0,144 kWh	3,473 ± 0,123 kWh	3,499 ± 0,124 kWh

6. CONCLUSIONES

El desarrollo del trabajo de grado permitió cumplir con los tres objetivos específicos planteados como se evidencia en los capítulos 2, 3 y 4 de este documento.

En el Capítulo 2 se documenta tanto la construcción de la estructura de soporte de los paneles FV del sistema GRIPV #1 como el diseño e implementación de la instalación eléctrica de los paneles del GRIPV #1 para inyectar la energía eléctrica generada por los paneles al sistema eléctrico del edificio y se hace una descripción de los sistemas GRIPV con lo cual se cumple el objetivo específico uno.

La implementación del sistema de monitorización utilizado que incluye las características de los diferentes equipos de medición utilizados, la implementación de los mismos y la adecuación de la infraestructura para realizar la experimentación requerida es detallada en el Capítulo 3, cumpliendo así con el objetivo específico dos.

El objetivo tres se desarrolla en el Capítulo 4 donde se describe un aplicativo desarrollado en MATLAB para analizar toda la información obtenida del proceso de monitorización realizado. Todas las variables monitorizadas se visualizan y analizan por medio del este aplicativo.

Desde la instalación del sistema GRIPV #1 han transcurrido más de nueve meses, tiempo en el cual las estructuras han soportado adecuadamente todas las variaciones climáticas que se han dado, tanto las cargas máximas producidas por el viento en el lugar, las altas temperaturas que ha habido durante estos meses. Adicionalmente la infraestructura implementada permite realizar las variaciones de altura requeridas para los diferentes casos de estudios planteados. Por lo tanto, se puede calificar que el diseño e implementación de la infraestructura para el sistema fotovoltaico de tres paneles de 255 W ha funcionado adecuadamente.

La conexión directa del GRIPV #1 a la red eléctrica del edificio de Ingeniería Eléctrica inyecta una energía del orden de 2,85 kWh/día dado que cada panel fotovoltaico genera en promedio 950 Wh/día. Realizando una proyección anual, la generación de energía eléctrica que se produciría con este sistema es de aproximadamente 1 MWh, lo que se traduce en un ahorro de \$508 900 COP después de recuperada la inversión de la construcción del sistema y teniendo en cuenta que el precio del kWh para la UIS por el mes de febrero de 2016 fue de \$495,97 COP.

El aplicativo tiene un gran potencial para futuros estudios donde se quieran comparar diferentes configuraciones en sistemas de generación fotovoltaica y se requiera una etapa de registro de datos, ya que el GUI de Matlab que se diseñó puede ser editado sin dificultad alguna con el fin de adaptarlo a las diferentes variables que se requieran analizar. Esta Interfaz Gráfica de Usuario de Matlab permite realizar análisis gráfico, por lo tanto, el aplicativo podría usarse como un centro de información gráfica del sistema tratado.

Con relación al impacto del techo verde en la generación de energía eléctrica de un panel fotovoltaico, la experimentación realizada permite extraer las siguientes conclusiones:

- a) En la operación de los módulos fotovoltaicos, la altura media de instalación del panel fotovoltaico sobre el techo verde tiene incidencia en la energía eléctrica generada por el panel, ya que la variación de esta describe un conjunto de efectos que a continuación se describen.
- b) Cuando la altura del panel sobre el techo verde es muy cercana (25 cm), el efecto del techo verde en la reducción de la temperatura del panel es inferior a otras alturas. En la experimentación realizada se considera que el efecto es negativo, ya que se generó menos energía eléctrica (0,58%) que el panel tomado como referencia, de iguales características, pero ubicado a una altura de 75 cm.
- c) Una vez la altura del panel se separó más del techo verde (50 cm), la generación de energía del panel fue mayor en un 0,17% que la energía generada por el panel de referencia ubicado a 75 cm del techo verde.
- d) Cuando los dos paneles se instalaron a una altura de 100 cm y 125 cm, respectivamente, sobre el techo verde, se esperaba que el panel que estaba más cerca al techo verde (100 cm) generará más energía, sin embargo, no fue así y el panel generó 0,76% menos energía que el panel más alejado del techo verde (125 cm). Por esa razón se puede concluir que cuando el panel es instalado sobre una altura superior a 100 cm del techo verde; dicha separación hace insignificante el efecto del techo verde y el comportamiento de la energía generada y la temperatura de trabajo de los paneles pueden estar relacionados con otros factores externos como la velocidad del viento.

Es importante resaltar que los resultados de esta experimentación tienen validez en la ciudad de Bucaramanga, ubicada cerca de la línea ecuatorial y con un clima tropical húmedo debido a la ubicación sobre el nivel del mar. Por consiguiente, los datos no son extrapolables a otras locaciones que estén ubicadas en sitios con características geográficas diferentes.

Finalmente, con relación al impacto que ha tenido la realización de este trabajo de grado con nuestro proceso de formación como profesionales de la ingeniería, se ha considerado continuar con la profundización del estudio en el sector de las energías renovables, teniendo en cuenta que se pueden realizar modelados de los factores externos que afectan la generación de estos tipos de sistemas renovables y así poder realizar análisis para el mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica, además de los estudio económicos que relacionen calidad de la energía versus costos.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar los cambios de altura de los paneles fotovoltaicos en horas de la noche, dado que al no existir generación fotovoltaica no se vean afecta el registro de datos y se presentan comportamientos inesperados en las variables monitorizadas.

Los techos verdes requieren de irrigación diaria y mantenimiento regular, para evitar el crecimiento de malezas y por ende el cambio de las características que ofrecen las plantas especiales para cubiertas verdes.

Para el correcto funcionamiento del aplicativo, se requiere de Matlab 2014b o superior.

CITAS

- [1] J. M. Rey López and P. P. Vergara Barrios, "Diseño de una microred de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará," Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [2] Y. García Carrascal and J. Mantilla Gamarra, "Implementación de un convertidor CD-CD para el seguimiento del punto de máxima potencia de generadores fotovoltaicos," Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2014.
- [3] C. E. Castellanos Martínez and G. A. Quiñones Gonzáles, "Integración de sistemas fotovoltaicos a la red: técnicas de control para el seguimiento del punto de máxima potencia," Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [4] O. F. Sierra Matajira and D. J. Rincon Adarme, "Integración de generadores fotovoltaicos a la red eléctrica: análisis comparativo de los algoritmos utilizados para el control de las potencias activa y reactiva," Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [5] P. P. Vergara barrios, J. M. Rey López, G. A. Osma Pinto, and G. Ordóñez Plata, "Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga," Revista, *UIS Ingenierías*, vol. 13,n2, pp. 49–57, 2014.
- [6] J. E. Camargo Carvajal and Á. A. Dallos Castellanos, "Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos en las edificaciones y zonas endurecidas de la sede central de la Universidad Industrial de Santander," Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [7] F. C. Cala Gonzáles and C. A. Rodriguez Suañudo, "Diseño de un sistema de suministro de energía eléctrica con tecnología solar fotovoltaica," Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [8] Y. B. Lizarazú Basto and L. A. Torres Salazar, "Diseño de un sistema de generación eléctrica fotovoltaica y una red eléctrica en corriente continua de baja tensión para el posible nuevo edificio eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander," Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [9] W. Martínez Ortiz and N. R. Santamaría Forero, "Diseño de una herramienta computacional en matlab para el análisis energético de sistemas fotovoltaicos," Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [10] S. C. M. Hui and S. C. Chan, "Integration of green roof and solar photovoltaic systems," *Jt. Symp. 2011 Integr. Build. Des. New Era Sustain.*, no. November, pp. 1–12, 2011.
- [11] C. Lamnatou and D. Chemisana, "A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 264–280, 2015.
- [12] J. M. Mendez Muñoz, R. Cuervo García, and ECA Instituto de Tecnología y Formación S.A.U., *Energía Solar Fotovoltaica*, 2nd ed. Madrid, 2007.

- [13] O. A. Arenas Santamaría and A. M. Oviedo Pinzón, “Estudio técnico y financiero de implementación de paneles solares enfocado a centros comerciales,” Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2009.
- [14] V. Mascarós Mateo, *Instalaciones Generadoras Fotovoltaicas: Un cambio hacia la sostenibilidad*, 1st ed. Madrid, 2015.
- [15] J. L. Valentín Labarta, *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*. Navarra: Editorial Donostiarra, 2012.
- [16] S. C. Aparicio Romero, “Metodología para la formulación de proyectos de generación de energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos,” Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [17] G. A. Osma Pinto, “Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander,” Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [18] Paneles solares PR, “Micro-Inversor Vs. Inversor Central (‘String Inverter’),” 2014. [Online]. Available: <http://panelessolarespr.com/microvstring.html>.
- [19] enecsys micro inverters, “Overviews,” 2014. [Online]. Available: <http://www.enecsys.com/resources/overview/>.
- [20] PVEDUCATION.ORG, “Mismatch effects,” 2014. [Online]. Available: <http://pveducation.org/pvcdrom/modules/mismatch-effects>.
- [21] Teknosolar.com, “Microinversor Modular Enphase M215,” 2014. [Online]. Available: <http://www.teknosolar.com/microinversor-modular-enphase-m215.html>.
- [22] Unidad de Planeación Minero Energética, “Atlas de Radiación Solar de Colombia,” 2005. [Online]. Available: http://www.upme.gov.co/Atlas_Radiacion.htm.
- [23] Ergea, “Casos de éxito,” 2014. [Online]. Available: <http://www.ergea.com.co/index.php/ct-menu-item-31>.
- [24] HYBRYTEC, “Proyecto microinversores UPB Medellín,” 2014. [Online]. Available: <http://www.hybrytec.com/Files/Casos/20141031145519686890499.PDF>.
- [25] APROTEC, “Sistemas interconectados a la red,” 2014. [Online]. Available: http://aprotec.com.co/pages/proyectos_interconectado2.htm.
- [26] M. Köhler, M. Schmidt, M. Laar, U. Wachsmann, and S. Krauter, “Photovoltaic-panels on greened roofs: positive interaction between two elements of sustainable architecture,” Revista, *RIO 02 - World Climate & Energy Event*, no. 1, pp. 151–158, 2002.
- [27] A. Nagengast, C. Hendrickson, and H. Scott Matthews, “Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice,” Revista, *Energy and Buildings*, vol. 64, Elsevier B.V., pp. 493–502, Sep-2013.
- [28] Asociación de la Industria Fotovoltaica, *Sistemas de Energía Fotovoltaica: Manual del Instalador*, 2nd ed. Pujol & Amado S L L, 2005.
- [29] ABB, “MICRO-0.25/0.3/0.3HV-I-OUTD-US-208/240 Product manual.” ABB, p. 55,

2014.

- [30] G. Minke, *Techos Verdes - Planificación, ejecución y consejos prácticos*. Montevideo: Fin de siglo, 2004.
- [31] D. Chemisana and C. Lamnatou, "Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance," Revista, *Applied Energy*, vol. 119, Elsevier Ltd, pp. 246–256, Apr-2014.
- [32] Kipp&Zonen, "Instruction Manual: SMP Series - Smart Pyranometer." Kipp&Zonen.
- [33] S. Saez Ruiz and L. Fonta Avila, "Incertidumbre de la Medición: Teoría y Práctica." L&S Consultores C.A., Maracay, p. 88, 2001.
- [34] Universidade de Santiago, "Expresión de la incertidumbre de medida." [Online]. Available: http://www.usc.es/gir/docencia_files/tdd/incertidumbres.pdf.

BIBLIOGRAFÍA

ABB. ABB micro inverter system [online]. [cited 14 February 2016]. Available in: https://library.e.abb.com/public/0ac164c3b03678c085257cbd0061a446/MICRO-CDD_BCD.00373_EN.pdf

ABB. MICRO-0.25/0.3/0.3HV-I-OUTD-US-208/240 Product manual [online]. Rev 1.1. 2014 [cited 15 April 2016]. Available in: <https://library.e.abb.com/public/f398eca735f13f34c1257cec00364cad/MICRO-0.25-0.3-0.3HV-I-OUTD-US%20product%20manual%20rev%20na%201.1.pdf>

Accuenergy. AcuDC 240 Series DC Power and Energy Meters [online]. [cited 14 February 2016]. Available in: <https://www.accuenergy.com/files/acudc/AcuDC-240-DC-Power-Energy-Meter-Brochure.pdf>.

APARICIO, Susana. Metodología para la formulación de proyectos de generación de energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos. Bucaramanga, 2010. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

APROTEC. Sistemas interconectados a la red [en línea]. [consultado el 20 de mayo de 2015]. Disponible en: http://aprotec.com.co/pages/proyectos_interconectado2.htm.

ARENAS, Oscar y OVIEDO, Andrés. Estudio técnico y financiero de implementación de paneles solares enfocado a centros comerciales. Bucaramanga, 2009. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Asociación de la Industria Fotovoltaica. Sistemas de Energía Fotovoltaica: Manual del Instalador. 2 ed. Pujol & Amado S L L, 2005.

CALA, Fabián y RODRIGUEZ, Carlos. Diseño de un sistema de suministro de energía eléctrica con tecnología solar fotovoltaica. Bucaramanga, 2010. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

CAMARGO, Jesús y DALLOS, Álvaro. Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos en las edificaciones y zonas endurecidas de la sede central de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2011. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

CASTELLANOS, Carol y QUIÑONES, Giovanni. Integración de sistemas fotovoltaicos a la red: técnicas de control para el seguimiento del punto de máxima potencia. Bucaramanga, 2013. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

CHEMISANA, D and LAMNATOU, Chr. Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. In: Applied Energy. April, 2014. Vol. 119, p. 246–256.

Enecsys micro inverters. Overviews [online]. [cited 20 may 2015]. Available in: <http://www.enecsys.com/resources/overview/>.

Enphase Energy. Envoy communications gateway [Online]. Rev. 0.5. [cited 14 February 2016]. Available in: http://enphase.com/sites/default/files/Envoy_Installation_and_Operation_NA.pdf.

Ergea. Casos de éxito [en línea]. [consultado el 20 de mayo de 2015]. Disponible en: <http://www.ergea.com.co/index.php/ct-menu-item-31>.

GARCIA, Yuliany y MANTILLA, Jesus. Implementación de un convertidor CD-CD para el seguimiento del punto de máxima potencia de generadores fotovoltaicos. Bucaramanga, 2014. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

HUI, Sam and CHAN, S. Integration of green roof and solar photovoltaic systems. In: Proceedings of Joint Symposium 2011: Integrated Building Design in the New Era of Sustainability (22, November, 2011: Hong Kong). p. 1-10

HYBRYTEC. Proyecto micro-inversores UPB Medellín [en línea]. [consultado el 20 de mayo de 2015]. Disponible en: <http://www.hybrytec.com/Files/Casos/20141031145519686890499.PDF>.

Kipp& Zonen. Instruction Manual: SMP Series - Smart Pyranometer [online]. [cited 14 February 2016]. Available in: <http://www.kippzonen.com/Download/583/Manual-SMP-series-Smart-Pyranometers>.

KOEHLER, M. et al. Photovoltaic-panels on greened roofs: positive interaction between two elements of sustainable architecture. In: RIO 02 - World Climate & Energy Event (2002). p. 151–158.

LAMNATOU, Chr and CHEMISANA, D. A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance. In: Renewable & Sustainable Energy Reviews. March, 2015. Vol. 43, p. 264–280

LIZARAZÚ, Yury y TORRES, Leydi. Diseño de un sistema de generación eléctrica fotovoltaica y una red eléctrica en corriente continua de baja tensión para el posible nuevo edificio eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2010. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

MARTÍNEZ, Willian y SANTAMARÍA, Nelson. Diseño de una herramienta computacional en Matlab para el análisis energético de sistemas fotovoltaicos. Bucaramanga, 2012. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

MASCAROS, Vicente. Instalaciones Generadoras Fotovoltaicas: Un cambio hacia la sostenibilidad. 1ra Ed. Madrid: Paraninfo S.A., 2015.

MENDEZ, Javier. Energía Solar Fotovoltaica. 2 Ed. Madrid: Fundación CONFEMETAL, 2007.

MINKE, Gernot. Techos Verdes: Planificación, ejecución y consejos prácticos. Traducido por Denize Entz Lagrotta. Montevideo: Fin de siglo, 2004.

NAGENGAST, Amy, HENDRICKSON, C, and MATTHEWS, H. Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice. In: Energy and Buildings. September, 2013. Vol. 64, p. 493–502.

Omega. 8 Channel Thermocouple Data Loggers[online]. [cited 14 February 2016]. Available in: <http://www.pace-sci.com/data-loggers-xr5.htm>.

OSMA, German. Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2011. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Eléctrica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Pace Scientific. XR5-SE Data Logger [online]. [cited 14 February 2016]. Available in: <http://www.pace-sci.com/data-loggers-xr5.htm>.

Paneles solares PR. Micro-Inversor Vs. Inversor Central ('String Inverter') [en línea]. 2014 [consultado el 14 de abril de 2016]. Disponible en: <http://panelessolarespr.com/microvstring.html>.

PVEDUCATION. Mismatch effects [Online]. [cited 20 may 2015]. Available: <http://pveducation.org/pvcdrom/modules/mismatch-effects>.

REY, Juan y VERGARA, Pedro. Diseño de una micro red de baja tensión para el laboratorio de integración energética del parque tecnológico de Guatiguará. Bucaramanga, 2012. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

SAEZ, Sijifredo y FONT, Luis. Incertidumbre de la Medición: Teoría y Práctica. 1 ed. Maracay: L&S Consultores C.A, 2001. 88p.

SIERRA, Oscar y RINCON, David. Integración de generadores fotovoltaicos a la red eléctrica: análisis comparativo de los algoritmos utilizados para el control de las potencias activa y reactiva. Bucaramanga, 2013. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

Teknosolar. Microinversor Modular Enphase M215 [en línea]. [consultado el 20 de mayo de 2015]. Disponible en: <http://www.teknosolar.com/microinversor-modular-enphase-m215.html>.

Universidad de Santiago. Expresión de la incertidumbre de medida [En línea]. [cited 18 april 2016]. Disponible en: http://www.usc.es/gir/docencia_files/tdd/incertidumbres.pdf.

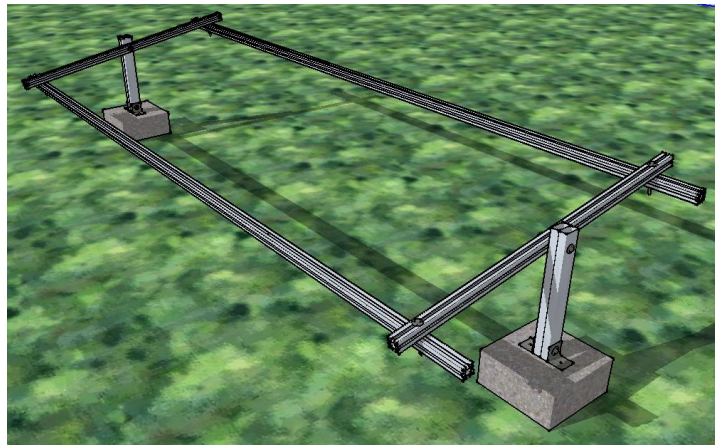
VALENTÍN, José. Instalaciones Solares Fotovoltaicas. Navarra: Editorial Donostiarra, 2012.

VERGARA, Pedro, et, al. Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga. En: UIS Ingenierías. 2014. Vol. 13, No 2; p. 49–57.

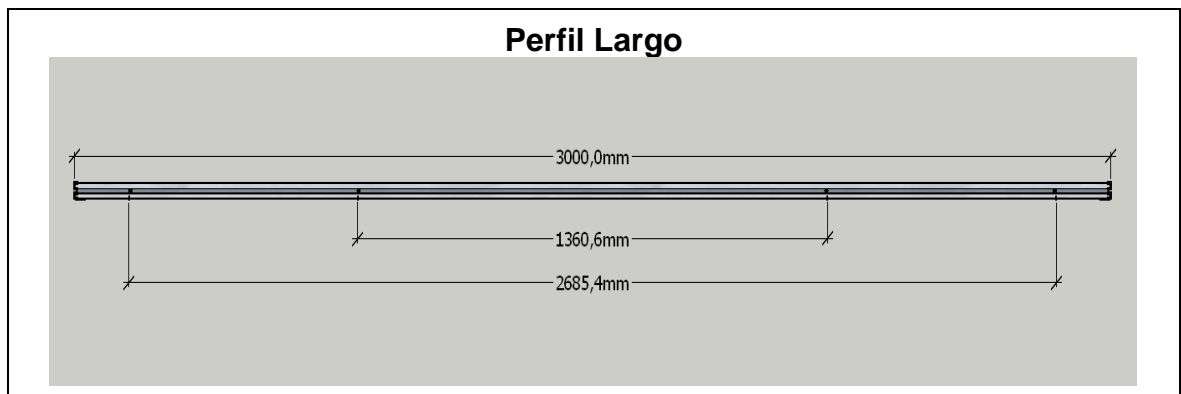
ANEXOS

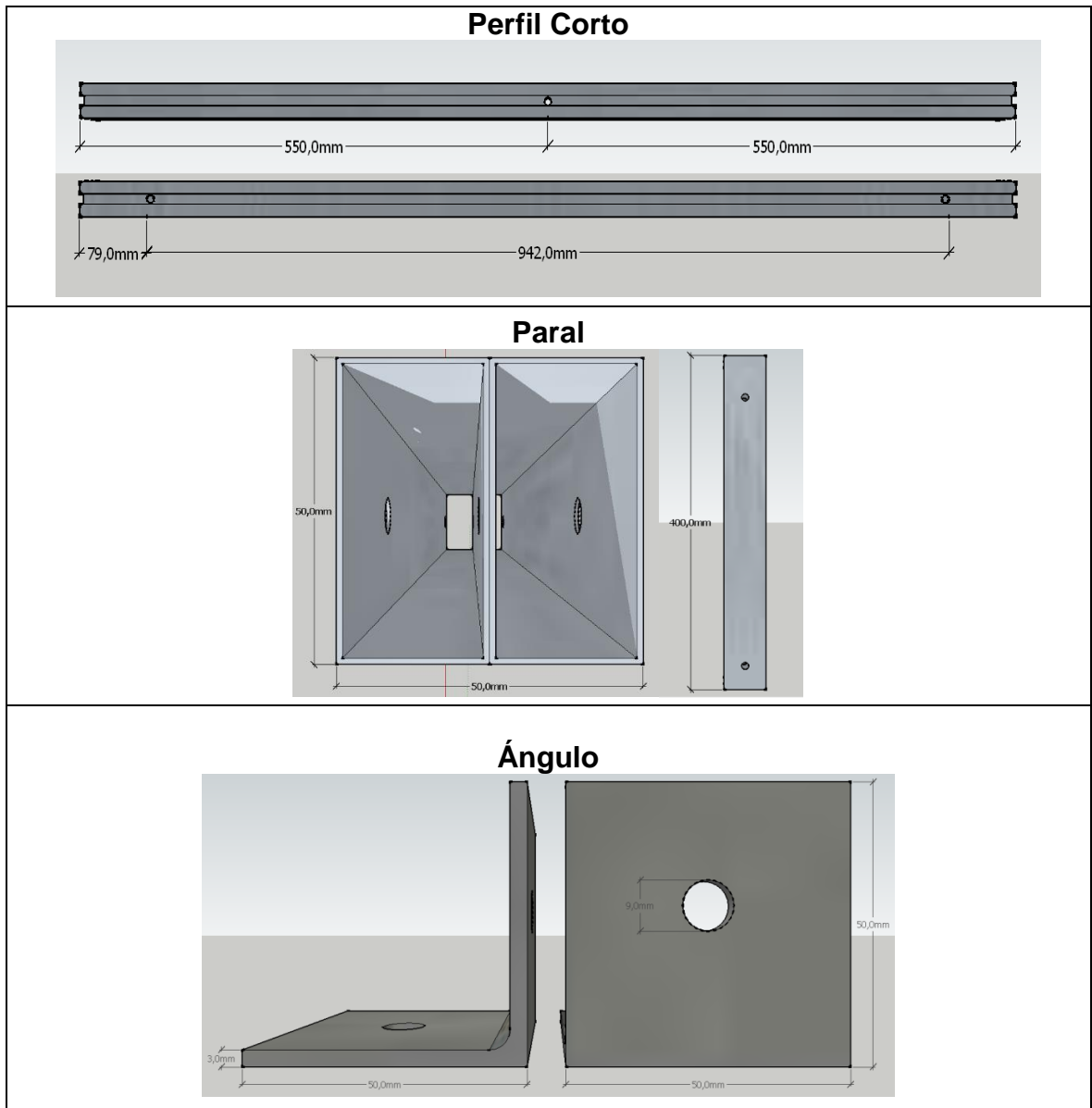
ANEXO A. Características técnicas de la estructura del sistema GRIPV#1

Este anexo se presenta por la necesidad de ilustrar las diferentes partes que componen la estructura del GRIPV #1 y que se puede apreciar en la siguiente figura.



La estructura consta principalmente de cuatro partes, dos perfiles tipo estrella en aluminio anodizado, uno largo y uno corto de 3000 mm y 1100 mm respectivamente. La tercera parte es el paral reforzado de 50 x 50 mm, esto requirió de dos perfiles de aluminio anodizado rectangulares de 50 x 25 mm unidos. Por último, se tienen los “ángulos” de 50 x 50 x 50 mm en acero y de grosor de 3 mm. Todas las perforaciones de las diferentes partes son de 9 mm.





La tornillería requerida para el ensamble de la estructura es la siguiente, se describen en pulgadas pues de esa forma se encuentran en el mercado. Los tornillos de 5/16" se usan en el anclaje de los paneles FV y de los micro-inversores.

Cantidad	Tipo	Complemento
6	(A) Tornillo hexagonal de 3/8" x 4"	12 Arandelas y tuercas 6 arandelas de presión
4	Anclaje de 3/8" x 2 ^{1/2} "	

2	(B) Tornillo hexagonal de 3/8" x 3"	4 Arandelas y tuercas 2 arandelas de presión
8	(C) Tornillo hexagonal 5/16" x 2 ^{1/2} "	16 Arandelas y tuercas 8 arandelas de presión

PROCEDIMIENTO PARA EL ARMADO DE LA ESTRUCTURA

Una vez se tenían cortados y perforados cada uno de los perfiles, parales y ángulos, se procedió a armar la estructura, donde se describirá a continuación.

1. Se anclaron los ángulos a los morteros de concreto por medio de los anclajes.
2. Luego se instala el paral con los tornillos (B) a los ángulos dispuestos en los morteros, estos parales determinarán la altura media de instalación del panel.
3. Posteriormente los perfiles largos se unen a los perfiles cortos por medio de los tornillos (A) a través de los agujeros de los extremos, formando un marco donde se instala inmediatamente el panel FV.
4. Finalmente se instala el Marco – Panel FV a los parales con tornillos los tornillos (B).

ANEXO B. Descripción detallada del aplicativo

Para una mejor interacción del usuario y poder analizar las gráficas de este trabajo de grado por medio del aplicativo, se explica a continuación el uso del aplicativo y las herramientas que en él se incluyen.

La aplicación consta de 3 partes, el menú principal (ver Figura 28), el aplicativo para análisis de datos del GRIPV #3 (ver Figura 29) y GRIPV #1 (ver Figura 31).

El proceso para la visualización de una gráfica es ilustrado a continuación y el uso correcto de las herramientas para el análisis gráfico y las opciones que ofrecen.

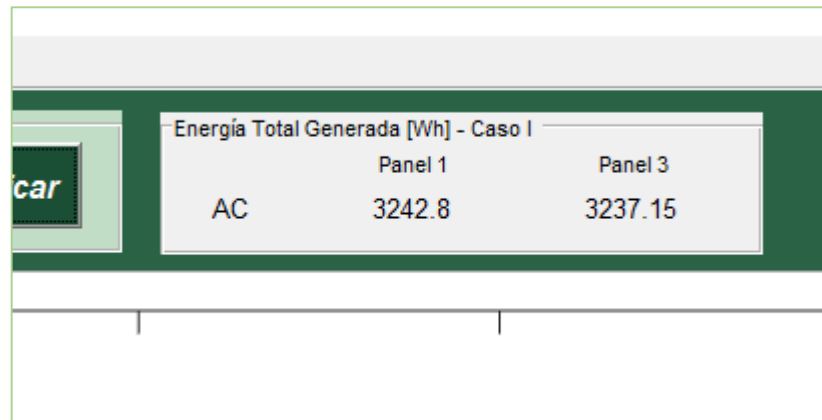
Una vez seleccionado en el menú principal “GRIPV #1” para analizar las curvas del Caso I se debe seleccionar “caso I” en el panel de control tal como lo muestra la siguiente figura.



Dado que en este sistema solo registró la potencia a la salida de los micro-inversores, inmediatamente se selecciona el caso de interés se debe pulsar el botón “Graficar” para mostrar la gráfica de Potencia AC que se muestra a continuación.



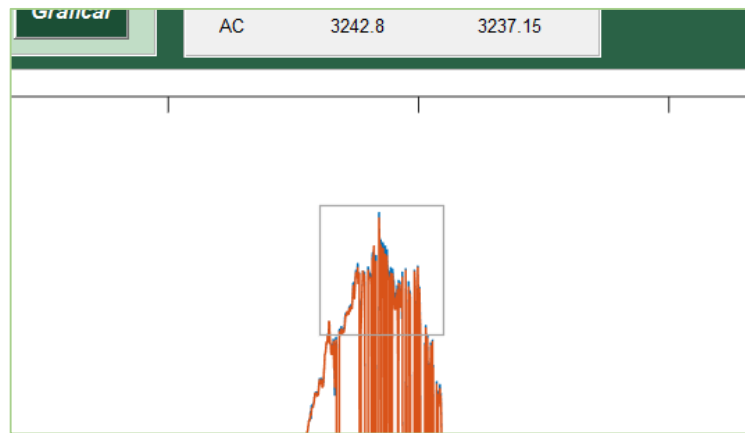
Teniendo visualizada la gráfica de interés, se puede ver de manera clara la energía total generada durante cada caso en el recuadro superior como se muestra a continuación.



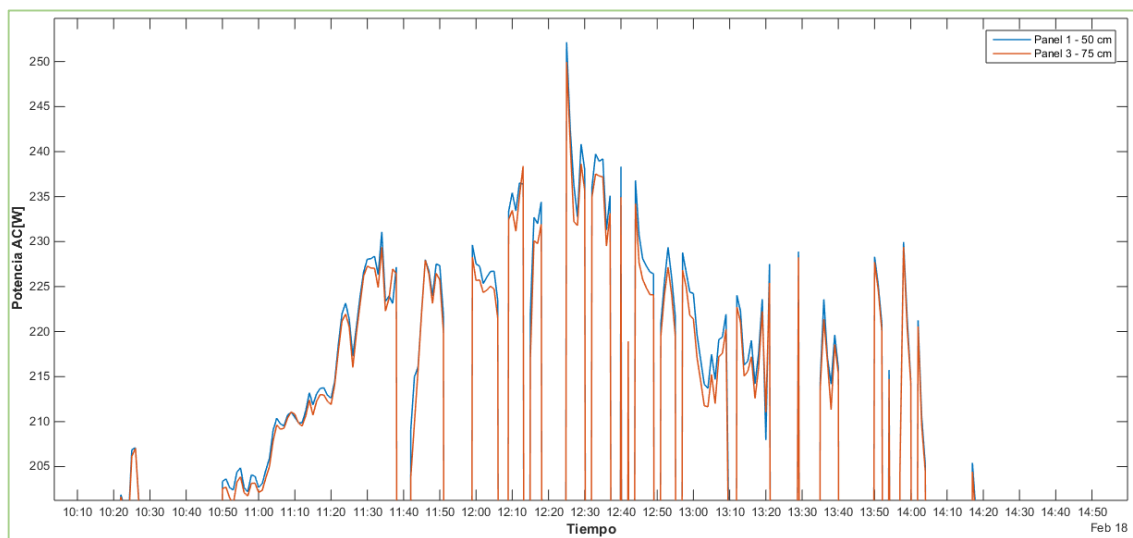
Adicionalmente se encuentra en la parte superior izquierda las herramientas que se mencionan en la sección 5.1 que son el cursor de datos, zoom y la posibilidad de mover la gráfica tal como se muestra en la siguiente figura.



Entonces para hacer zoom solo hay que seleccionar la herramienta “Zoom in” y activarla para aumentar la zona de interés y de igual manera con “Zoom out” para reducir, pero también está la posibilidad de hacer un aumento personalizado de una porción con las dimensiones deseadas haciendo clic sostenido para crear un rectángulo que encierre la parte a aumentar tal como se ve en la siguiente figura.

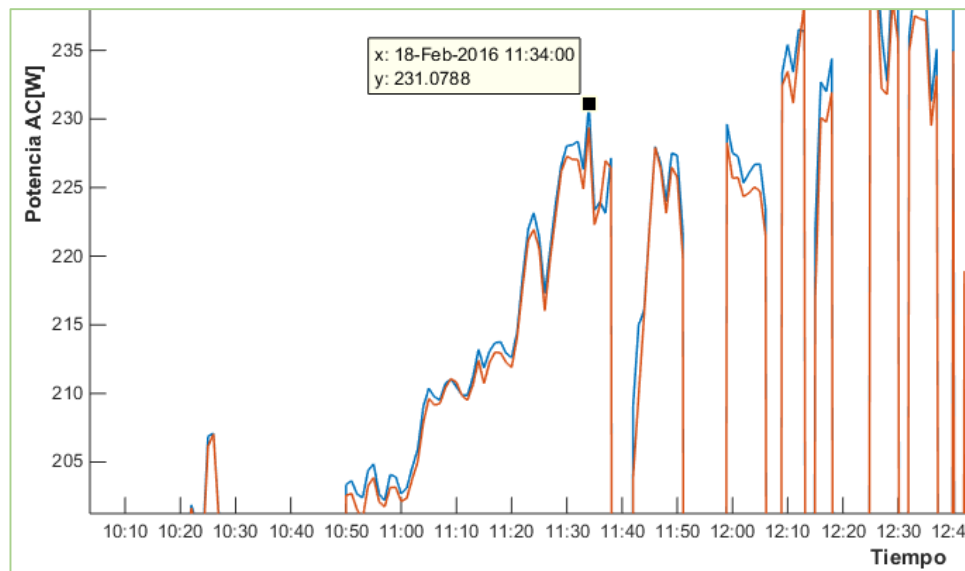


Como se observa en la siguiente figura, el resultado de esa acción es la visualización de la gráfica mostrando la parte del dominio y rango deseado.



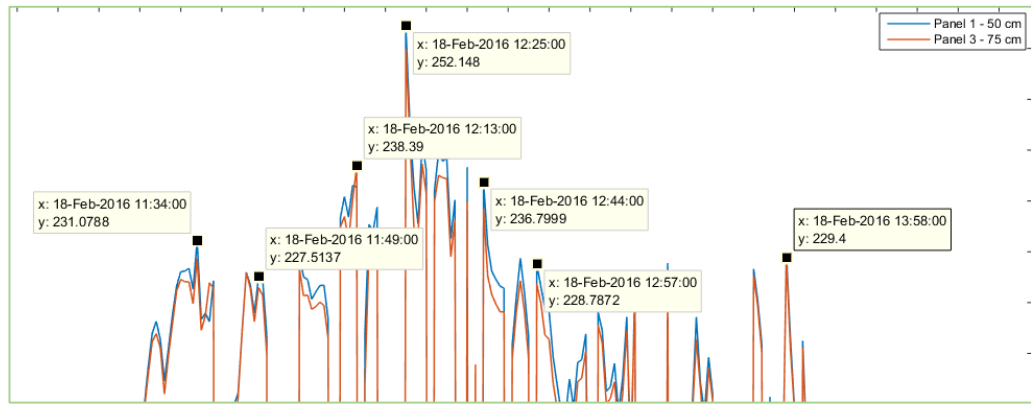
Es evidente que el eje horizontal donde se muestra el tiempo se ajusta automáticamente, eso ocurre siempre que amplía o se reduce la gráfica, cabe resaltar que esa característica está disponible en la versión de Matlab y superiores con la fue diseñado el aplicativo ya que puede manejar datos en formato de fecha y que fue un aspecto donde se invirtió trabajo para que fuera posible hacer análisis sin perder de vista el tiempo de los hechos.

Hasta este punto se pueden hacer análisis visuales. Sin embargo, para hacer estudios más detallados, está la herramienta cursor de datos. Si se quiere conocer a qué hora se presentó un determinado valor de potencia, saber cuál fue la mínima o la máxima potencia eléctrica o saber por ejemplo que potencia eléctrica generaban los paneles al medio día, debe presionarse el botón de cursor de datos en la barra de herramientas y hacer clic en el punto de la gráfica del cual se quiere obtener la información, tal como se muestra en la siguiente figura.

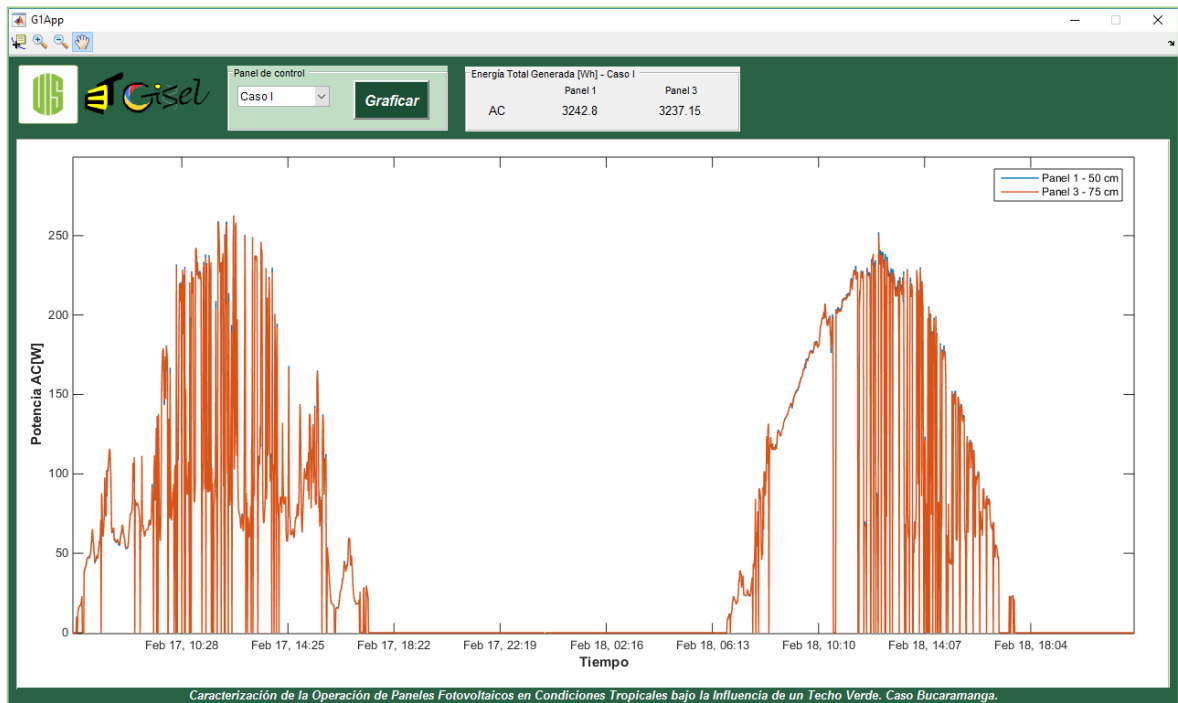


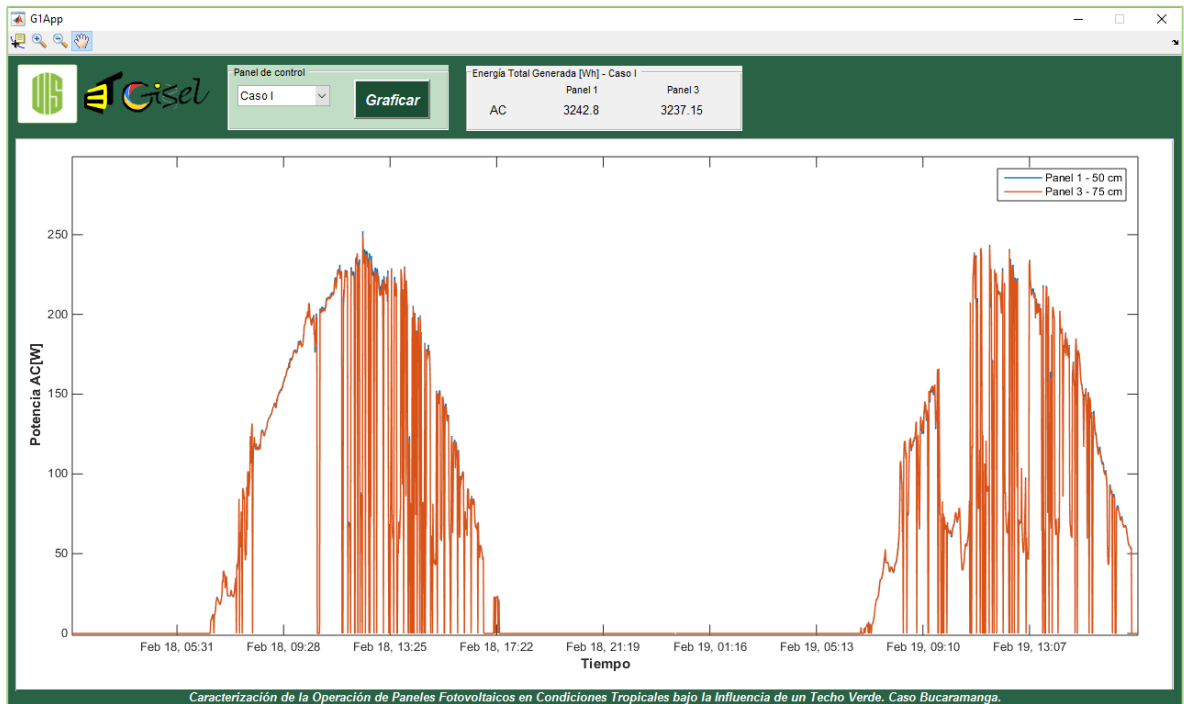
En este ejemplo, el 18 de febrero de 2016 a las 11:34 a.m., la potencia eléctrica a la salida del micro-inversor del Panel 1 es de 231,08 W.

Ahora cuando no es suficiente un solo punto y se quiere ver la información de más puntos al tiempo, debe mantenerse presionada la tecla "Shift" al momento de hacer clic en un nuevo punto porque si no se procede de esta forma automáticamente se borra la información del último punto visualizado. Así entonces, el resultado es el mostrado a continuación.



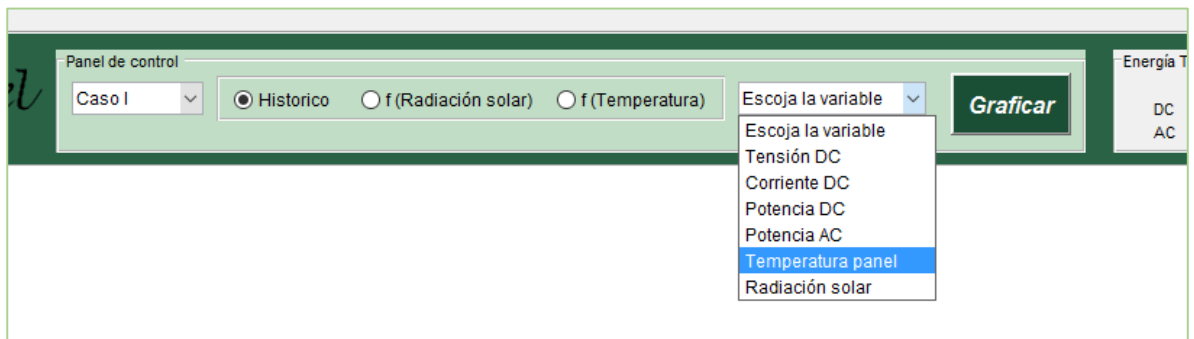
Por último y no menos importante está disponible la herramienta para mover la gráfica, se tiene la libertad de moverla en cualquier dirección haciendo clic sostenido y moviendo el puntero en la dirección deseada con el fin de acomodar el contenido del cuadro de gráficas. Las dos figuras que están a continuación, muestran que se ha movido la curva hacia la derecha en una de ellas y en la otra figura hacia la izquierda. También es evidente que el eje del tiempo se ajusta automáticamente al cambio.



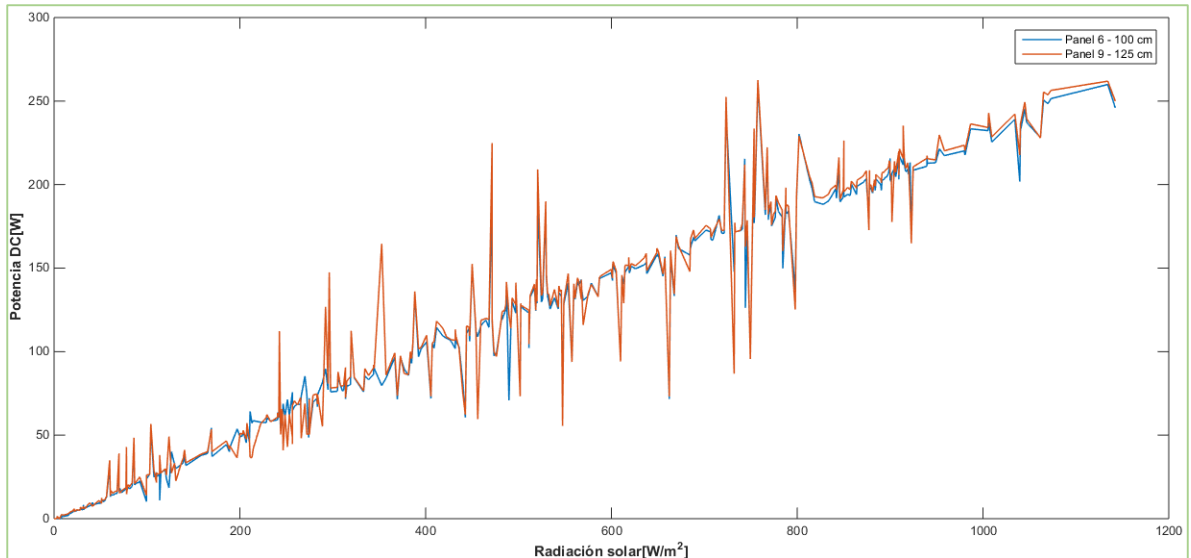


Hasta este punto ya es posible hacer un análisis grafico detallado del sistema GRIPV #1. De la misma forma funciona el aplicativo para el análisis grafico de sistema GRIPV #3 y que se explica a continuación con la diferencia de que en este sistema también hay registro de la potencia eléctrica generada por los paneles, la temperatura de estos y la radiación solar.

Teniendo en cuenta lo anterior aparecen dos nuevos menús, uno de ellos permite presentar graficas en función de la radiación solar y de la temperatura, pero solo para dar una idea de estos comportamientos pues los datos previamente se organizaron de tal forma en hojas adicionales del archivo .xlsx por medio de Excel. El otro menú tiene las variables que se desean visualizar como se muestra en la siguiente figura.



Por ejemplo, si se desea visualizar la potencia eléctrica generada por los paneles en función de la radiación solar se debe seleccionar “f(Radiación solar)” y “Potencia DC” respectivamente dando como resultado la siguiente gráfica.



CODIGO FUENTE DEL APLICATIVO

El funcionamiento general del aplicativo se basa en leer los archivos .xlsx de cada caso, donde se ha compilado la información de los dos paneles que en ese caso se monitorizaron. Estos datos son tratados y visualizados en la aplicación dependiendo de las opciones de los menús. Estos archivos deben encontrarse en la misma carpeta de los archivos del aplicativo .fig y .m.

MENÚ

```
function varargout = menu(varargin)
% MENU Código de MATLAB para menu.fig
%
% menu ejecuta una ventana con opciones para elegir:
% Casos GRIPV #1 o Casos GRIPV #3
%
% Last Modified by GUIDE v2.5 20-Apr-2016 15:51:56

% Comienzo del código de inicialización - NO EDITAR
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
```

```

        'gui_OpeningFcn', @menu_OpeningFcn, ...
        'gui_OutputFcn', @menu_OutputFcn, ...
        'gui_LayoutFcn', [], ...
        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% Fin del codigo de inicialización - NO EDITAR

% Esta función se ejecuta justo antes que el MENU se hace visible.
% Lo que hace es tomar leer los logos institucionales de los archivo
% .png y lo muestra en axes etiquetado como "logo"
function menu_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

I = imread('mlogoapp.png'); %Lee el archivo .png.
axes(handles.logo); %Selecciona el "axes" a usar.
imshow(I); %Muestra el logo en el "axes".
axis off; %Quita la numeración de los ejes.

handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = menu_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

% Esta función se ejecuta al presionar el botón GRIPV #1 que se ha
% etiquetado como "gripv1", a presionar el botón se ejecuta el
% archivo G1App.m que corresponde al código de matlab de la interfaz
% del archivo G1App.fig
function gripv1_Callback(hObject, eventdata, handles)

G1App; %Ejecuta el archivo G1App.m
close(menu); %Cierra el menú

% Esta función se ejecuta al presionar el botón GRIPV #3 que se ha
% etiquetado como "gripv2", a presionar el botón se ejecuta el
% archivo G2App.m que corresponde al código de matlab de la interfaz
% del archivo G2App.fig
function gripv2_Callback(hObject, eventdata, handles)

G2App; %Ejecuta el archivo G2App.m
close(menu); %Cierra el menú

```

GRIPV #3

```
function varargout = G2App(varargin)
% G2APP codigo de MATLAB para G2App.fig

% Last Modified by GUIDE v2.5 25-Apr-2016 00:55:05

% Comienzo del codigo de inicialización - NO EDITAR
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @G2App_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @G2App_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% FIN del codigo de inicialización - NO EDITAR

% Esta función se ejecuta justo antes que el MENU se hace visible. Lo que
% hace es leer los logos institucionales de los archivo .png y lo muestra
% en el axes etiquetado como "logo". Adicionalmente guarda los contenidos
% de los menus expandibles para las variables a visualizar como tambien
% las etiquetas y las unidades de los ejes de los axes destinados para
% las
% graficas.
function G2App_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
global C1 C2 C3 Uy Ux
% "global" se usa para compartir variables entre funciones.
% C indica contenido p.e. C1
% U indica unidades p.e. Uy: Unidades del eje Y

I = imread('logoapp2.png');
axes(handles.logo);
imshow(I);
axis off;

% Se pone el boton historico sin selección(0) ya que por defecto es 1.
% Esto se hace para obligar a usar el botón "Historico" para que pueda
% cargar el menu expandible de las variables en la primera ejecución.
set(handles.buttonH, 'Value', 0);
```

```

C1 = {'Escoja la variable', 'Tensión DC', 'Corriente DC', 'Potencia
DC', 'Potencia AC', 'Temperatura panel', 'Radiación solar'};
C2 = {'Escoja la variable', 'Tensión DC', 'Corriente DC', 'Potencia
DC', 'Potencia AC', 'Temperatura panel'};
C3 = {'Escoja la variable', 'Tensión DC', 'Corriente DC', 'Potencia
DC', 'Potencia AC'};
Uy = {'N/A', '[V]', '[A]', '[W]', '[W]', '[°C]', '[W/m^2]'};
Ux = {'Tiempo', 'Radiación solar[W/m^2]', 'Temperatura panel[°C]'};

handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = G2App_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

% Esta función se ejecuta cuando hay un cambio o selección en el menu
% expandible de los casos. donde se puede escoger entre caso I y caso II
% del GRIPV #3 y obtiene el valor y el texto de dicha selección
function menuC_Callback(hObject, eventdata, handles)
global word L s C
% L: variable para almacenar la leyenda de las dos curvas.
% word: variable para guardar el nombre del archivo a leer.
% C: variable para almacenar el texto del caso seleccionado.

s = get(hObject, 'Value'); % Se guarda el valor de la selección.
C = get(hObject, 'String'); % Se guarda el texto de la selección.

% Cambios en este menú ponen todos los botones sin seleccion, para
obligar
% seleccionar alguna opción despues de se ha escogido alguno de los
casos.
set(handles.buttonH, 'Value', 0);
set(handles.buttonR, 'Value', 0);
set(handles.buttonT, 'Value', 0);

% las siguientes lineas se usan para guardar el nombre del archivo de
% interes y la leyenda que se va a usar en la gráfica.
if s == 2
    word = 'G3_casol.xlsx';
    L = {'Panel 6 - 100 cm', 'Panel 9 - 125 cm'};
elseif s == 3
    word = 'G3_caso2.xlsx';
    L = {'Panel 6 - 100 cm', 'Panel 9 - 75 cm'};
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function menuC_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');

```

end

```
% Esta función se ejecuta cuando se presiona el boton "Historico", aqui
se
% lee como tabla la primera hoja del archivo de excel cuyo nombre se toma
% de la variable word. Luego de esto se convierte en una matriz las
% columnas 2 en adelante y la primera columna se convierte a formato de
% fechas, esto se hace para que al momento de hacer zoom las fechas se
% ajusten automaticamente.
function buttonH_Callback(hObject, eventdata, handles)
global word T C1 M DT wdc6 wac6 wdc9 wac9
% T indica Type (Tipo), se usa para ubicar la hoja en el archivo .xlsx
% DT: variable para Date Time

T = 1;

% Estas sentencia pone "escoja variable" en el menu de variables
set(handles.menuV, 'value', 1);
% Esta sentencia pone el contenido en el menu de variables
set(handles.menuV, 'string', C1);

% Las siguientes lineas lee la tabla la convierte y en los tipos de
% variables deseados.
mx = readtable(word);
M = table2array(mx(:,2:13)); %Array desde V_DC hasta Rad solar prom.
DT = datetime(char(table2array(mx(:,1))), 'inputformat', 'dd/MM/yyyy
hh:mm:ss a');

% Calcular energia total generada.
wdc6 = sum((5/60)*(M(:,3)));
wac6 = sum((5/60)*(M(:,4)));
wdc9 = sum((5/60)*(M(:,9)));
wac9 = sum((5/60)*(M(:,10)));

% Esta función se ejecuta cuando se presiona el botón f(Radiacion solar).
% Dado que en este caso se va a leer la segunda hoja del archivo y en
este
% caso los datos estan en funcion de radiación se puede leer como una
% matriz.
function buttonR_Callback(hObject, eventdata, handles)
global word T C2 M

T = 2;
set(handles.menuV, 'value', 1);
set(handles.menuV, 'string', C2);
M = xlsread(word, T);

% Esta función se ejecuta cuando se presiona el botón f(Temperatura).
Dado
```

```

% que en este caso se va a leer la tercera hoja del archivo y en este
caso
% los datos estan en funcion de la temperatura se puede leer como una
% matriz.
function buttonT_Callback(hObject, eventdata, handles)
global word T C3 M

T = 3;
set(handles.menuV, 'value', 1);
set(handles.menuV, 'string', C3);
M = xlsread(word, T);

% Este menú se ejecuta cuando se selecciona la variable que se quiere
% visualizar en el axes destinado para ello.
function menuV_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Uy Ux V Ly Lx T
% V: Variable, valor que se usa para ubicar la columna de la variable
deseada
% Lx: variable para la Leyenda del eje X
% Ly: variable para la Leyenda del eje Y

V = get(hObject, 'Value');
cont1 = get(hObject, 'string');

% Strcat concatena palabras para la leyenda del eje Y
Ly = strcat(cont1(V), Uy(V));
Lx = Ux(T);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function menuV_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function info_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% Esta función se ejecuta cuando se presiona el botón GRAFICAR
function toplot_Callback(hObject, eventdata, handles)
global M T V DT Ly Lx L wdc6 wac6 wdc9 wac9 C s

% Las dos siguientes lineas se usan para asignar el titulo al cuadro
donde
% se muestra la información de la energia total generada y los valores de
% dicha energia.
TI2 = strcat('Energía Total Generada [Wh] - ', {' '}, C(s));
set(handles.Info2, 'title', TI2);
set(handles.dc6, 'string', wdc6);

```

```

set(handles.ac6, 'string', wac6);
set(handles.dc9, 'string', wdc9);
set(handles.ac9, 'string', wac9);

% Las siguientes lineas son para graficar la curva de la variable
deseada,
% mostrar las leyendas, y asignar el grosor de la linea.
if T == 1
    var1 = V-1;
    var2 = var1+6;
    plot(handles.axes1, DT, M(:,var1), DT, M(:,var2), 'LineWidth',1);
    legend(handles.axes1,L);
    ylabel(handles.axes1,Ly, 'fontweight', 'bold');
    xlabel(handles.axes1,Lx, 'FontWeight', 'bold');
elseif T == 2
    var3 = V+5;
    plot(handles.axes1, M(:,1), M(:,V), M(:,1), M(:,var3), 'LineWidth',1);
    legend(handles.axes1,L);
    ylabel(handles.axes1,Ly, 'fontweight', 'bold');
    xlabel(handles.axes1,Lx, 'FontWeight', 'bold');
else
    var4 = V+5;
    plot(handles.axes1, M(:,1), M(:,V), M(:,6), M(:,var4), 'LineWidth',1);
    legend(handles.axes1,L);
    ylabel(handles.axes1,Ly, 'fontweight', 'bold');
    xlabel(handles.axes1,Lx, 'FontWeight', 'bold');
end
end

```

GRIPV #1

```

function varargout = G1App(varargin)
% G1APP codigo de MATLAB para G1App.fig

% Last Modified by GUIDE v2.5 10-Mar-2016 17:30:59

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @G1App_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @G1App_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else

```

```

    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before G1App is made visible.
function G1App_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

%   A continuación se lee la imagen de los logos
%   institucionales y se muestran en un axes.
I = imread('logoapp2.png');
axes(handles.logo);
imshow(I);
axis off;

handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

%--- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = G1App_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on selection change in menu1.
function menu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global word L M DT S C wac1 wac3
%   L indica leyenda.
%   word se usa para guardar el nombre del archivo a leer.

%   Obtener el valor del este menu para ubicar el archivo de interes.
S = get(hObject, 'Value');
C = get(hObject, 'String');

if S == 2
    word = 'G1_caso1.xlsx';
    L = {'Panel 1 - 50 cm', 'Panel 3 - 75 cm'};
elseif S == 3
    word = 'G1_caso2.xlsx';
    L = {'Panel 1 - 25 cm', 'Panel 3 - 75 cm'};
end

%   Leer archivo .xlsx
mx = readtable(word);
M = table2array(mx(:,2:3));
DT = datetime(char(table2array(mx(:,1))), 'inputformat', 'dd/MM/yyyy
hh:mm:ss a');

%   Calcular acumulado de las muestras de potencia
wac1 = sum((1/60)*(M(:,1)));
wac3 = sum((1/60)*(M(:,2)));

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function menu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function info_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

% --- Se ejecuta cuando se presiona el boton toplot.
function toplot_Callback(hObject, eventdata, handles)
global M DT L wac1 wac3 C S

% Concatenar dos textos para usar de titulo en Info2
TI2 = strcat('Energía Total Generada [Wh] - ',{' '},C(S));
set(handles.Info2,'title',TI2);

% Mostrar total generado en los textos estaticos ac1 y ac3
set(handles.ac1,'string',wac1);
set(handles.ac3,'string',wac3);

plot(handles.axes, DT, M(:,1), DT, M(:,2),'LineWidth',1);
legend(handles.axes,L);
ylabel(handles.axes,'Potencia AC[W]','fontweight','bold');
xlabel(handles.axes,'Tiempo','FontWeight','bold');

```

ANEXO C. Cálculo de incertidumbres

Uno de los objetivos de este trabajo de grado es establecer el beneficio de un sistema fotovoltaico al ser integrado con un sistema de techo verde, por lo cual se realizaron mediciones de variables tales como la radiación solar, temperatura, potencia, entre otras. Con el fin de lograr una interpretación acertada de la información es importante considerar el valor de la incertidumbre del proceso de medición realizado, ya que el resultado de una medición no está completo si no tiene asociada la incertidumbre en la medición con un nivel de confianza determinado.

De ningún modo es la incertidumbre de la medición un término equivalente al error de la medición o a la precisión de la misma bajo condiciones de repetibilidad o reproducibilidad [33]. La incertidumbre hace referencia al grado de posible variación en los resultados del proceso de medida que subsiste tras haber aplicado las correcciones pertinentes [34].

A continuación, se procederá a calcular la incertidumbre de los valores de las medidas más representativas y expuestas en el desarrollo de este libro tales como radiación solar, temperatura y energía.

La incertidumbre para cada una de las medidas puntuales está dada por la siguiente expresión.

$$\mu = \text{Clase del equipo en \%} \times \text{Valor de la medida}$$

Dado a que los datos de temperatura y radiación fueron almacenados en Dataloggers los cuales tienen su propia incertidumbre, la incertidumbre final se obtiene con la siguiente expresión.

$$\mu_F = \sqrt{\mu^2 + \mu_D^2}$$

Donde:

μ_F : *Incertidumbre final*

μ : *Incertidumbre de la medida*

μ_D : *Incertidumbre del datalogger*

GRIPV #3

Tabla Incertidumbres para el GRIPV #3

Variables	Radiación Solar	Temperatura	Potencia AC	Potencia DC	Datalogger Omega	Datalogger Pace
Incertidumbre	±2%	±0,75%	±2,5%	±0,2%	±0,5°C	±0,3°C ±0,2% [V]

CASO I

RADIACION SOLAR

En la franja de máxima radiación solar

$$R_{MAX} = 1142,45 \text{ W/m}^2$$

$$\mu_{RMAX} = 2\% * 1142,45 = 22,84 \text{ W/m}^2$$

$$\mu_D = 0,2\% * 1142,45 = 2,285 \text{ W/m}^2$$

$$\mu_F = \sqrt{22,84^2 + 2,29^2} = 22,954 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Valor estimado } R_{MAX} = 1142,45 \pm 22,95 \text{ W/m}^2$$

$$R_{MIN} = 185,45 \text{ W/m}^2$$

$$\mu_{RMIN} = 2\% * 185,45 = 3,70 \text{ W/m}^2$$

$$\mu_D = 0,2\% * 185,45 = 0,371 \text{ W/m}^2$$

$$\mu_F = \sqrt{3,70^2 + 0,371^2} = 3,719 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Valor estimado } R_{MIN} = 185,45 \pm 3,72 \text{ W/m}^2$$

Radiación solar mínima con la cual se genera energía

$$R_{GMIN} = 7,50 \text{ W/m}^2$$

$$\mu_{RGMIN} = 2\% * 7,5 = 0,15 \text{ W/m}^2$$

$$\mu_D = 0,2\% * 7,5 = 0,015 \text{ W/m}^2$$

$$\mu_F = \sqrt{0,15^2 + 0,015^2} = 0,151 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Valor estimado } R_{GMIN} = 7,50 \pm 0,15 \text{ W/m}^2$$

TEMPERATURA

DIA 1

Variación de la diferencia de temperatura entre los paneles 6 y 9

$$\begin{aligned}T_1 &= T_6 - T_9 = 40,45 - 40,45 = 0 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T_9 &= \sqrt{(0,75\% * 40,45)^2 + 0,3^2} = 0,43 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T_6 &= \sqrt{(0,75\% * 40,45)^2 + 0,5^2} = 0,58 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T_1 &= \Delta T_9 + \Delta T_6 = 1,01 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Valor estimado } T_1 &= \mathbf{0 \pm 1,01 \text{ }^\circ\text{C}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T_2 &= T_9 - T_6 = 65,80 - 59,1 \approx 7 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T_9 &= \sqrt{(0,75\% * 65,80)^2 + 0,3^2} = 0,74 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T_6 &= \sqrt{(0,75\% * 59,10)^2 + 0,5^2} = 0,67 \text{ }^\circ\text{C} \\ \Delta T_2 &= \Delta T_9 + \Delta T_6 = 1,41 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Valor estimado } T_2 &= \mathbf{7 \pm 1,41 \text{ }^\circ\text{C}}\end{aligned}$$

Temperatura máxima panel 6

$$\begin{aligned}T_{\text{MAXP6}} &= 63,15^\circ\text{C} \\ \mu_{T_{\text{MAXP6}}} &= 0,75\% * 63,15 = 0,47 \text{ }^\circ\text{C} \\ \mu_F &= \sqrt{0,47^2 + 0,5^2} = 0,686 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Valor estimado } T_{\text{MAXP6}} &= \mathbf{63,15 \pm 0,69 \text{ }^\circ\text{C}}\end{aligned}$$

Temperatura máxima panel 9

$$\begin{aligned}T_{\text{MAXP9}} &= 66,17^\circ\text{C} \\ \mu_{T_{\text{MAXP9}}} &= 0,75\% * 66,17 = 0,49 \text{ }^\circ\text{C} \\ \mu_F &= \sqrt{0,49^2 + 0,3^2} = 0,575 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Valor estimado } T_{\text{MAXP9}} &= \mathbf{66,17 \pm 0,58 \text{ }^\circ\text{C}}\end{aligned}$$

DIA 2

Variación de la diferencia de temperatura entre los paneles 6 y 9

$$\begin{aligned}T_1 &= T_6 - T_9 = 56,95 - 56,48 \approx 0,5 \text{ °C} \\ \Delta T_9 &= \sqrt{(0,75\% * 56,48)^2 + 0,3^2} = 0,52 \text{ °C} \\ \Delta T_6 &= \sqrt{(0,75\% * 56,95)^2 + 0,5^2} = 0,66 \text{ °C} \\ \Delta T_1 &= \Delta T_9 + \Delta T_6 = 1,18 \text{ °C} \\ \text{Valor estimado } T_1 &= \mathbf{0,5 \pm 1,18 \text{ °C}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T_2 &= T_9 - T_6 = 50,08 - 46,1 \approx 4 \text{ °C} \\ \Delta T_9 &= \sqrt{(0,75\% * 50,08)^2 + 0,3^2} = 0,48 \text{ °C} \\ \Delta T_6 &= \sqrt{(0,75\% * 46,10)^2 + 0,5^2} = 0,61 \text{ °C} \\ \Delta T_2 &= \Delta T_9 + \Delta T_6 = 1,10 \text{ °C} \\ \text{Valor estimado } T_2 &= \mathbf{4 \pm 1,10 \text{ °C}}\end{aligned}$$

Temperatura máxima panel 6

$$\begin{aligned}T_{MAXP6} &= 57,1 \text{ °C} \\ \mu_{TMAXP6} &= 0,75\% * 57,1 = 0,42 \text{ °C} \\ \mu_F &= \sqrt{0,42^2 + 0,5^2} = 0,653 \text{ °C} \\ \text{Valor estimado } T_{MAXP6} &= \mathbf{57,10 \pm 0,65 \text{ °C}}\end{aligned}$$

Temperatura máxima panel 9

$$\begin{aligned}T_{MAXP9} &= 59,71 \text{ °C} \\ \mu_{TMAXP9} &= 0,75\% * 59,71 = 0,44 \text{ °C} \\ \mu_F &= \sqrt{0,44^2 + 0,3^2} = 0,533 \text{ °C} \\ \text{Valor estimado } T_{MAXP9} &= \mathbf{59,71 \pm 0,53 \text{ °C}}\end{aligned}$$

DIA 3

Variación de la diferencia de temperatura entre los paneles 6 y 9

$$\begin{aligned}T_1 &= T_6 - T_9 = 53,5 - 52,4 \approx 1 \text{ °C} \\ \Delta T_9 &= \sqrt{(0,75\% * 52,4)^2 + 0,3^2} = 0,49 \text{ °C} \\ \Delta T_6 &= \sqrt{(0,75\% * 53,5)^2 + 0,5^2} = 0,64 \text{ °C}\end{aligned}$$

$$\Delta T_1 = \Delta T_9 + \Delta T_6 = 1,13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Valor estimado $T_1 = 1 \pm 1,13 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$T_2 = T_6 - T_9 = 57,55 - 52,5 \approx 5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_9 = \sqrt{(0,75\% * 52,50)^2 + 0,3^2} = 0,50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_6 = \sqrt{(0,75\% * 57,55)^2 + 0,5^2} = 0,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = \Delta T_9 + \Delta T_6 = 1,16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Valor estimado $T_2 = 5 \pm 1,16 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura máxima panel 6

$$T_{MAXP6} = 59,05^\circ\text{C}$$

$$\mu_{TMAXP6} = 0,75\% * 59,05 = 0,44 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\mu_F = \sqrt{0,44^2 + 0,5^2} = 0,666^\circ\text{C}$$

Valor estimado $T_{MAXP6} = 59,05 \pm 0,66 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura máxima panel 9

$$T_{MAXP9} = 58,00^\circ\text{C}$$

$$\mu_{TMAXP9} = 0,75\% * 58 = 0,43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\mu_F = \sqrt{0,43^2 + 0,3^2} = 0,524 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Valor estimado $T_{MAXP9} = 58,00 \pm 0,52 \text{ } ^\circ\text{C}$

ENERGIA TOTAL GENERADA POR LOS PANELES (DC) 6 Y 9

Para obtener la incertidumbre en la medida de las energías, dado que esta es una medida indirecta porque se obtiene con las medidas de tensión y corriente, variables linealmente independientes. Teniendo en cuenta que la exactitud en la medición de tensión y corriente en los medidores de continua y alterna, aparece el factor $\sqrt{2}$ multiplicado por la incertidumbre en la medida resultado de simplificar la expresión de la incertidumbre combinada. Por ejemplo, con el medidor AcuDC sería $\mu_F = \sqrt{0,2^2 + 0,2^2} = 0,2\sqrt{2}$

$$E_{DCP6} = 4,027 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EDCP6} = 0,2\sqrt{2}\% * 4,027 = 0,0113 \text{ kWh}$$

Valor estimado $E_{DCP6} = 4,027 \pm 0,011 \text{ kWh}$

$$E_{DCP9} = 4,078 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EDCP9} = 0,2\sqrt{2}\% * 4,078 = 0,0115 \text{ kWh}$$

$$\text{Valor estimado } E_{DCP9} = 4,078 \pm 0,011$$

$$E_{DCP9} - E_{DCP6} = 0,051 \pm 0,022 \text{ kWh}$$

ENERGIA TOTAL GENERADA A LA SALIDA DE LOS INVERSORES (AC) 6 Y 9

$$E_{ACP6} = 4,050 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EACP6} = 2,5\sqrt{2}\% * 4,05 = 0,143 \text{ kWh}$$

$$\text{Valor estimado } E_{ACP6} = 4,050 \pm 0,14 \text{ kWh}$$

$$E_{ACP9} = 4,081 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EACP9} = 2,5\sqrt{2}\% * 4,081 = 0,144 \text{ kWh}$$

$$\text{Valor estimado } E_{ACP9} = 4,081 \pm 0,144 \text{ kWh}$$

$$E_{DCP9} - E_{DCP6} = 0,031 \pm 0,0284 \text{ kWh}$$

CASO II

ENERGIA TOTAL GENERADA POR LOS PANELES (DC) 6 Y 9

$$E_{DCP6} = 3,436 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EDCP6} = 0,2\sqrt{2}\% * 3,436 = 0,0097 = 0,01 \text{ kWh}$$

$$\text{Valor estimado } E_{DCP6} = 3,436 \pm 0,097 \text{ kWh}$$

$$E_{DCP9} = 3,466 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EDCP9} = 0,2\sqrt{2}\% * 3,466 = 0,0098 \text{ kWh}$$

$$\text{Valor estimado } E_{DCP9} = 3,466 \pm 0,098 \text{ kWh}$$

$$E_{DCP9} - E_{DCP6} = 0,030 \pm 0,195 \text{ kWh}$$

ENERGIA TOTAL GENERADA A LA SALIDA DE LOS INVERSORES (AC) 6 Y 9

$$E_{ACP6} = 3,473 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EACP6} = 2,5\sqrt{2} \% * 3,473 = 0,123 \text{ kWh}$$

$$\text{Valor estimado } E_{ACP6} = 3,473 \pm 0,123 \text{ kWh}$$

$$E_{ACP9} = 3,499 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EACP9} = 2,5\sqrt{2} \% * 3,499 = 0,124 \text{ kWh}$$

$$\text{Valor estimado } E_{ACP9} = 3,499 \pm 0,124 \text{ kWh}$$

$$E_{DCP9} - E_{DCP6} = 0,026 \pm 0,247 \text{ kWh}$$

GRIPV#1

Tabla Incertidumbres para el GRIPV #1

Variables	Potencia AC
Incertidumbre	±5%

CASO I

ENERGIA TOTAL GENERADA A LA SALIDA DE LOS INVERSORES (AC) 1 Y 3

$$E_{ACP1} = 3,242 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EACP1} = 5\sqrt{2} \% * 3,242 = 0,229$$

$$\text{Valor estimado } E_{ACP1} = 3,242 \pm 0,229 \text{ kWh}$$

$$E_{ACP3} = 3,237 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EACP3} = 5\sqrt{2} \% * 3,237 = 0,229$$

$$\text{Valor estimado } E_{ACP3} = 3,237 \pm 0,229 \text{ kWh}$$

$$E_{DCP1} - E_{DCP3} = 0,005 \pm 0,458 \text{ kWh}$$

CASO II

ENERGIA TOTAL GENERADA A LA SALIDA DE LOS INVERSORES (AC) 1 Y 3

$$E_{ACP1} = 2,447 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EACP1} = 5\sqrt{2} \% * 2,447 = 0,175$$

$$\text{Valor estimado } E_{ACP1} = 2,447 \pm 0,175 \text{ kWh}$$

$$E_{ACP3} = 2,462 \text{ kWh}$$

$$\mu_{EACP3} = 5\sqrt{2} \% * 2,462 = 0,174$$

$$\text{Valor estimado } E_{ACP3} = 2,462 \pm 0,174 \text{ kWh}$$

$$E_{DCP3} - E_{DCP1} = 0,015 \pm 0,349 \text{ kWh}$$

ANEXO D. Certificado CIIMCA



October 9/2015

TO WHOM IT MAY CONCERN

Present

This is to certify that: Luz Esther Quiatero Sanguino, Germán Alfonso Osma Pinto, Miguel Andrés Torres Romero, Edgar Yesid Hernández Cristancho, Aura Milena Rueda Díaz, Gabriel Ordóñez Plata, presented the contribution: “*Visualization the thermal impact of GRIPV system through thermographic images.*” in the II **International Congress of Mechanical Engineering and Agricultural Science (CIIMCA 2015)**, from October 7th to 9th, 2015. Bucaramanga Colombia.

Sincerely,

Rolando Guzmán Lopez Ph.D.
rolando.guzman@upb.edu.co
Cell phone (57) 3006094165
Office phone: (57) (7) 679 6220. Ext. 566

Aduljay Remolina Millán Ph.D
aduljay.remolina@upb.edu.co
Cell phone (57) 3006101733
Office phone: (57) (7) 679 62 20 Ext. 566