

ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA
BASADO EN PANELES SOLARES CONSIDERANDO VARIABLES AMBIENTALES
EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

RAÚL MARTÍNEZ BERNAL.

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ
2017

ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE ENERGÍA ELÉCTRICA
BASADO EN PANELES SOLARES CONSIDERANDO VARIABLES AMBIENTALES
EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

RAÚL MARTÍNEZ BERNAL.

DIRECTOR
MSC EDWIN FRANCISCO FORERO GARCÍA

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ
2017

ABSTRACT

Currently in the world there are a lot of technologies that are being used to take advantage of the solar energy, which is the most clean and abundant of the renewable energies. The technology most used in this field is the photovoltaic, where the most of the photovoltaic cells are made of silicon, which is one of the chemical elements more abundant in nature. Of this technology mainly there are two types of photovoltaic cells of silicon, monocrystalline and polycrystalline. The efficiency of these cells is determined for their manufacturers in controlled conditions and typically is up to 14% in commercial panels. Besides of being low, the efficiency of the panels is affected by external factors, like the temperature or the humidity. For this reason there are several researches in different regions in the world about the influence that have their own climate in the efficiency of the photovoltaic panels.

The present work has been made to find out the relationship between the efficiency of these two types of photovoltaic panels, monocrystalline and polycrystalline, and the weather variation in the city of Bogota-Colombia. The power generated of two photovoltaic panels, one monocrystalline and one polycrystalline, were collected during one month the 24 hours in condition of variant weather. At the same time it was implemented one weather station that registered the variations of climatic variables like wind speed, temperature, humidity, irradiance and rain, in order to relate them with the generated power of each photovoltaic panel.

Once with this information collected it was made one study with all the correlated variables through of the statistic tool PCA (Principals Components Analysis) where it can see the impact of each climatic variable over the generated power in both panels and therefore its impact over the efficiency.

AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento a mi asesor de tesis, el Ingeniero Msc Edwin Francisco Forero García, docente de la facultad de ingeniería electrónica de la universidad Santo tomas, por su valiosa orientación, confianza e incondicional apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Agradecimiento sincero a la Universidad Santo Tomas, a los docentes que me instruyeron durante todo el proceso formativo e investigativo, dándome valiosas herramientas para la culminación de esta Maestría en ingeniería Electrónica.

A mi familia, soporte fundamental, que siempre ha estado a mi lado apoyándome en cada paso de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1	Planteamiento del problema.....	1
1.2	Justificación.....	2
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo general	3
1.3.2	Objetivos específicos	3
1.4	Marco teórico	3
1.4.1	Celda Fotovoltaica	3
1.4.2	Irradiancia	5
1.4.3	Pluviómetro	7
1.4.4	Anemómetro.....	8
1.4.5	Monitoreo de Potencia Eléctrica	8
1.4.6	Análisis de Componentes Principales PCA	9
1.5	Estado del arte	14
1.6	Metodología	17
2.	Diseño	19
2.1	Estación Meteorológica.....	21
2.1.1	Plataforma	21
2.1.2	Pluviómetro.....	24
2.1.3	Anemómetro.....	25
2.1.4	Sensor de Radiación Solar	27
2.1.5	Sensor de Humedad relativa y temperatura	29
2.2	Interfaz de Medición de Potencia.....	31
2.2.1	Sensores de Medición de Potencia.....	33
2.3	Paneles Solares.....	35
2.3.1	Panel Monocristalino RNG-50D.....	35
2.3.2	Panel Policristalino RNG-50P	37
2.3.3	Regulador Panel solar	38
2.3.4	Batería sistema de carga.....	40
2.3.5	Carga	41
2.4	Esquema de Conexiones Estación Meteorológica e Interfaz de Potencia.....	42
3.	Implementación y Validación	43
3.1	Validación de Mediciones de Potencia	46
3.1.1	Calculo de error y linealidad del sensor de voltaje	46
3.1.2	Calculo de error y linealidad del sensor de corriente.....	48
3.1.3	Verificación medición de potencia en paneles solares.....	50
3.2	Validación de Mediciones de variables climáticas	51
3.2.1	Irradiancia	52
3.2.2	Velocidad del viento	54
3.2.3	Temperatura	56
3.2.4	Humedad Relativa.....	57
3.2.5	Pluviometría	59

4.	Pruebas y Resultados	60
4.1	Relación Variables Climáticas	61
4.1.1	Irradiancia y Temperatura	61
4.1.2	Irradiancia y Pluviometría	62
4.1.3	Irradiancia y Humedad Relativa	63
4.1.4	Irradiancia y Velocidad del Viento	64
4.2	Relación de Variables Climáticas con Potencia Generada	65
4.2.1	Potencia Generada por los paneles de acuerdo a la Irradiancia	66
4.2.2	Potencia Panel Monocristalino e Irradiancia	66
4.2.3	Potencia Panel Monocristalino y Temperatura	68
4.2.4	Potencia Panel Monocristalino y Velocidad del Viento	69
4.2.5	Potencia Panel Monocristalino y Pluviometría	70
4.2.6	Potencia Panel Monocristalino y Humedad	71
4.2.7	Potencia Panel Policristalino e Irradiancia	71
4.2.8	Potencia Panel Policristalino y Temperatura	73
4.2.9	Potencia Panel Policristalino y Velocidad del Viento	74
4.2.10	Potencia Panel Policristalino y Pluviometría	75
4.2.11	Potencia Panel Policristalino y Humedad Relativa	76
5.	Análisis de Resultados	77
5.1	Análisis de Componentes Principales	79
5.1.1	Panel Monocristalino e Irradiancia	79
5.1.2	Panel Monocristalino y Temperatura	81
5.1.3	Panel Monocristalino y Pluviometría	83
5.1.4	Panel Monocristalino y Humedad Relativa	85
5.1.5	Panel Policristalino e Irradiancia	87
5.1.6	Panel Policristalino y Temperatura	89
5.1.7	Panel Policristalino y Velocidad del Viento	91
5.1.8	Panel Policristalino y pluviometría	93
5.1.9	Panel Policristalino y Humedad relativa	95
5.2	Eficiencia de paneles Monocristalino y Policristalino de acuerdo a Irradiancia ..	97
6.	Conclusiones	100
7.	Referencias	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Estructura de registro de variables	21
Tabla 2 Comparativo plataforma de estación meteorológica.....	22
Tabla 3 Comparativo Pluviómetro	24
Tabla 4 Comparativo anemómetro.....	25
Tabla 5 Comparación sensor de Irradiancia.....	27
Tabla 6 Comparación Interfaz medición de potencia	31
Tabla 7 Comparación sensor de potencia.....	33
Tabla 8 Datos calibración sensor de voltaje.....	46
Tabla 9 Datos calibración sensor de corriente	48
Tabla 10 Variables climáticas medidas para verificación.....	51
Tabla 11 Promedio diario de Irradiancia octubre 10-11am	53
Tabla 12 Registro IDEAM promedio horario de la radiación en Bogotá	54
Tabla 13 Viento Promedio diario octubre.....	55
Tabla 14 Humedad Relativa Octubre.....	58
Tabla 15 Formato archivo Log exportado a Excel.....	61
Tabla 16 Registros máximos de Irradiancia y temperatura.....	62
Tabla 17 Registros máximos de pluviometría.....	63
Tabla 18 Registros mínimos de humedad relativa	64
Tabla 19 Registros máximos de Velocidad del Viento	65
Tabla 20 Registros de Potencia Panel Monocristalino e Irradiancia.....	67
Tabla 21 Registros de Potencia Panel Monocristalino y Temperatura	69
Tabla 22 Registros de Potencia Panel Monocristalino y Velocidad del Viento	70
Tabla 23 Registros de Potencia Panel Monocristalino y Pluviometría	70
Tabla 24 Registros de Potencia Panel Monocristalino y Humedad Relativa.....	71
Tabla 25 Registros de Potencia Panel Policristalino e Irradiancia.....	72
Tabla 26 Registros de Potencia Panel Policristalino y Temperatura	74
Tabla 27 Registros de Potencia Panel Policristalino y Velocidad del Viento.....	75
Tabla 28 Registros de Potencia Panel Policristalino y Pluviometría	76
Tabla 29 Registros de Potencia Panel Policristalino y Humedad Relativa	76
Tabla 30 Datos de entrada PCA Panel Monocristalino – Irradiancia	79
Tabla 31 Coeficientes Componentes Principales Panel Monocristalino – Irradiancia	80
Tabla 32 Datos de entrada PCA Panel Monocristalino – Temperatura	81
Tabla 33 Coeficientes Componentes Principales Panel Monocristalino – Temperatura	82
Tabla 34 Datos de entrada PCA Panel Monocristalino – Pluviometría.....	83
Tabla 35 Coeficientes Componentes Principales Panel Monocristalino – Pluviometría.....	84
Tabla 36 Datos de entrada PCA Panel Monocristalino – Humedad	85
Tabla 37 Coeficientes Componentes Principales Panel Monocristalino – Humedad	86
Tabla 38 Datos de entrada PCA Panel Policristalino – Irradiancia	87
Tabla 39 Coeficientes Componentes Principales Panel Policristalino – Irradiancia	88
Tabla 40 Datos de entrada PCA Panel Policristalino – Temperatura	89
Tabla 41 Coeficientes Componentes Principales Panel Policristalino - Temperatura.....	90
Tabla 42 Datos de entrada PCA Panel Policristalino - Velocidad del Viento	91

Tabla 43 Coeficientes Componentes Principales Panel Policristalino -Viento	92
Tabla 44 Datos de entrada PCA Panel Policristalino – Pluviometría	93
Tabla 45 Coeficientes Componentes Principales Panel Policristalino - Pluviometría.....	94
Tabla 46 Datos de entrada PCA Panel Policristalino - Humedad Relativa.....	95
Tabla 47 Coeficientes Componentes Principales Panel Policristalino - Humedad Relativa	96
Tabla 48 Valores de eficiencia de paneles solares de acuerdo a Irradiancia	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Modelo de diodo simple de una celda fotovoltaica	4
Figura 2 Modelo de diodo doble de una celda fotovoltaica	4
Figura 3 Efecto de la Irradiancia en un panel solar	6
Figura 4 Efecto de la temperatura en un panel solar	6
Figura 5 Pluviómetro Tipping Bucket.....	8
Figura 6 anemómetro mecánico	8
Figura 7 Diseño conceptual plataforma de medición.....	19
Figura 8 Esquema conceptual estación meteorológica	20
Figura 9 Esquema Interfaz de Medición de Potencia.....	20
Figura 10 Plataforma de Hardware Estación Meteorológica (Owasys, 2011).....	23
Figura 11 Conector Unidad (Owasys, 2011)	23
Figura 12 Pluviómetro (Davis, 2013)	24
Figura 13 Mecanismo de un pluviómetro (Davis, 2013)	25
Figura 14 Anemómetro	26
Figura 15 Conector Anemómetro.....	27
Figura 16 Sensor de radiación solar	28
Figura 17 Respuesta coseno sensor de radiación solar	29
Figura 18 Diagrama de conexión sensor de radiación solar	29
Figura 19 Sensor de humedad relativa y humedad	29
Figura 20 Conector sensor de humedad.....	30
Figura 21 Protocolo 1bb.....	30
Figura 22 Plataforma medición de potencia.....	32
Figura 23 Esquema de conexión Arduino Yun	33
Figura 24 Sensor de corriente	34
Figura 25 direccionamiento sensores de corriente	34
Figura 26 Paneles solares monocristalino (izquierda) y policristalino (derecha)	35
Figura 27 Panel solar monocristalino.....	35
Figura 28 Características del panel monocristalino Vs Voltaje	36
Figura 29 Panel solar Policristalino	37
Figura 30 Características del panel policristalino Vs Voltaje	38
Figura 31 Regulador de panel solar	38
Figura 32 Funciones regulador panel solar	39
Figura 33 Batería sistema de carga	40
Figura 34 Curvas características de la batería	40
Figura 35 Lámpara de carga.....	41
Figura 36 Esquema de Conexiones Estación Meteorológica e Interfaz de Potencia	42
Figura 37 Ubicación Geográfica de la estación	43
Figura 38 Puesta de Paneles solares.....	43
Figura 39 Sensores Estación Meteorológica	44
Figura 40 Estación Meteorológica y paneles	44
Figura 41 Conexiones plataforma de procesamiento	45
Figura 42 Ubicación sensores	46

Figura 43 Ubicación paneles	46
Figura 44 Grafica calibración sensor de voltaje.....	47
Figura 45 Histograma error sensor de voltaje	48
Figura 46 Grafica calibración sensor de corriente	49
Figura 47 Histograma error sensor de corriente.....	50
Figura 48 Verificación sensor de Voltaje de panel solar policristalino	50
Figura 49 Verificación sensor de corriente de panel solar monocristalino	51
Figura 50 Irradiación Solar en Bogotá tomada del Atlas del IDEAM.....	52
Figura 51 Irradiancia diaria registrada por estación meteorológica.....	53
Figura 52 Velocidad del viento promedio en Bogotá, tomada del IDEAM.....	54
Figura 53 Mediciones de velocidad del viento en estación meteorológica.....	55
Figura 54 Velocidad del viento media de octubre	56
Figura 55 Gráficos IDEAM de Variabilidad Diaria de Temperatura	56
Figura 56 Medición Temperatura Estación Meteorológica	57
Figura 57 Registros históricos IDEAM de humedad relativa en Bogotá.....	57
Figura 58 Medición Humedad relativa Estación Meteorológica	58
Figura 59 Humedad Relativa Octubre.....	58
Figura 60 Registros históricos IDEAM de pluviometría en Bogotá.....	59
Figura 61 Medición Pluviometría Estación Meteorológica	59
Figura 62 Programa terminal descarga de Log	60
Figura 63 Comportamiento de la Irradiancia y Temperatura.....	62
Figura 64 Comportamiento de la Irradiancia y Pluviometría.....	63
Figura 65 Comportamiento de la Irradiancia y Humedad.....	64
Figura 66 Comportamiento de la Irradiancia y la Velocidad del Viento	65
Figura 67 Comportamiento de Potencia de los paneles y de la Irradiancia	66
Figura 68 Comportamiento de Potencia de panel Monocristalino e Irradiancia.....	67
Figura 69 Potencia P. Monocristalino vs Irradiancia.....	68
Figura 70 Comportamiento de Potencia de panel Monocristalino y Temperatura	68
Figura 71 Comportamiento de Potencia de panel Monocristalino y Velocidad del Viento	69
Figura 72 Comportamiento de Potencia de panel Monocristalino y Pluviometría	70
Figura 73 Comportamiento de Potencia de panel Monocristalino y Humedad Relativa.....	71
Figura 74 Comportamiento de Potencia de Panel Policristalino e Irradiancia.....	72
Figura 75 Potencia P. Policristalino vs Irradiancia	73
Figura 76 Comportamiento de Potencia de panel Policristalino y Temperatura	73
Figura 77 Comportamiento de Potencia de panel Policristalino y Velocidad del Viento....	74
Figura 78 Comportamiento de Potencia de panel Policristalino y Pluviometría	75
Figura 79 Comportamiento de Potencia de panel Policristalino y Humedad Relativa	76
Figura 80 Magnitud de las variables climáticas y de potencia.....	78
Figura 81 Grafica Componentes Principales Panel Monocristalino – Irradiancia.....	80
Figura 82 Grafica Componentes Principales Panel Monocristalino – Temperatura.....	82
Figura 83 Grafica Componentes Principales Panel Monocristalino – Pluviometría.....	84
Figura 84 Grafica Componentes Principales Panel Monocristalino – Humedad.....	86
Figura 85 Grafica Componentes Principales Panel Policristalino – Irradiancia	88
Figura 86 Grafica Componentes Principales Panel Policristalino -Temperatura.....	90

Figura 87 Grafica Componentes Principales Panel Policristalino -Viento	92
Figura 88 Grafica Componentes Principales Panel Policristalino – Pluviometría.....	94
Figura 89 Grafica Componentes Principales Panel Policristalino - Humedad Relativa	96
Figura 90 Eficiencia de paneles de acuerdo a Irradiancia.....	99
Figura 91 Componentes principales correlacionados con la eficiencia	99

1. Introducción

En el campo de la energía solar existen diferentes tecnologías que permiten el aprovechamiento de esta fuente inagotable de energía. Unas tecnologías son más eficientes que otras, pero así mismo varía el costo de su implementación, generalmente cuanto más eficiente es una tecnología más costosa es. Comercialmente las tecnologías más usadas en el mundo son las tecnologías de paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino (Ajdidi, Ouassaid, & Maaroufi, 2015), siendo los paneles monocristalinos los más eficientes.

Aunque los paneles fotovoltaicos vienen con una eficiencia determinada de acuerdo a su hoja técnica de especificaciones y fabricación, esta eficiencia es determinada en condiciones controladas de laboratorio a una irradiancia, temperatura y masa de aire a valores de condiciones estándar de pruebas (Maghami, Hizam, & Gomes, 2014). Generalmente las condiciones ambientales de cualquier región del mundo difieren considerablemente de las condiciones del laboratorio donde se especificaron los paneles. Por esta razón existen diversas investigaciones que se han hecho alrededor del mundo estudiando el efecto que tienen las diferentes variables ambientales de sus regiones en la eficiencia de los paneles de tecnología fotovoltaica monocristalina y policristalina.

En este trabajo de investigación se presenta el diseño e implementación de una estación meteorológica y de medición de potencia, donde se registran las variables climáticas más determinantes que afectan la captación de energía solar en la ciudad de Bogotá, tanto en un panel solar fotovoltaico de tecnología monocristalina como en un panel solar fotovoltaico de tecnología policristalina, todo esto para hacer un análisis a través de una herramienta estadística llamada PCA (Análisis de Componentes Principales) sobre el impacto real que tienen dichas variables sobre la eficiencia de las dos tecnologías de paneles consideradas.

1.1 Planteamiento del problema

Debido al gran auge que ha tenido el aprovechamiento de la energía solar, no solamente por el costo y agotamiento de las fuentes fósiles e hídricas de energía, sino también por ser una fuente inagotable de energía limpia y no contaminante, la industria ha evolucionado en materiales y técnicas de fabricación de paneles solares para captar y convertir esta energía en electricidad que pueda aprovechar directamente la población, con costos asequibles.

Sin embargo, el uso de energía solar no se ha desplegado por completo a nivel mundial debido a que la eficiencia de las celdas solares con que están contruidos los paneles sigue siendo relativamente baja, máximo hasta de un 20% en pruebas de laboratorio (Touati, Al-Hitmi, & Bouchech, 2012).

Adicional a que la eficiencia de los paneles solares es baja, también se ve afectada por factores ambientales y climáticos que dependen de acuerdo a la región o lugar donde los paneles son instalados, reduciendo aún más la potencia que se puede obtener del sistema energético (Touati, Al-Hitmi, & Bouchech, 2012).

Por lo anteriormente expuesto es de gran importancia poder determinar la eficiencia de los diferentes tipos de paneles solares en condiciones reales de instalación, puesto que la eficiencia que dan los fabricantes de los paneles es establecida en condiciones controladas de laboratorio y al momento de instalarlos en campo puede variar significativamente por factores ambientales, tales como la temperatura, el viento, la pluviometría, la humedad y de una manera determinante por la radiación solar que no en todos los lugares se presenta de la misma manera (Mariam & Husni, 2006).

1.2 Justificación

Un aspecto fundamental en el aprovechamiento de la radiación solar en la producción de energía eléctrica, está dado por la eficiencia de las celdas solares que se utilizan en la captación, lo cual finalmente determina la potencia que se puede obtener y el costo de la solución. La eficiencia viene determinada por varios factores, entre los que se encuentran los materiales con que está construida la celda, la técnica de construcción del panel y las condiciones ambientales donde se ubica el panel solar.

Siendo la eficiencia de las celdas solares un aspecto fundamental en el crecimiento y desarrollo de la industria energética basada en energía solar (Baojie Yan, 2012), se hace necesario contar con un medio tecnológico que permita registrar y analizar los factores que intervienen en la captación de energía a través de paneles solares, todo esto con el fin de poder determinar la afectación en la eficiencia que tienen las variables ambientales en los tipos de paneles solares comerciales, entre los que se encuentran los de tecnología monocristalina y los de tecnología policristalina.

A través de la información recopilada de las variables ambientales, relacionada con la energía generada por las tecnologías de paneles solares, es posible formular una metodología para la estimación de la eficiencia en condiciones ambientales determinadas. El impacto del desarrollo de este proyecto se ve reflejado en poder contar con una herramienta de gran utilidad para la caracterización de la captación de energía solar de acuerdo a la tecnología fotovoltaica utilizada considerando las condiciones ambientales únicas de un lugar determinado. Lo anterior permite determinar el verdadero potencial con que cuenta una región para la producción de energía eléctrica a partir de energía solar permitiendo también evaluar la viabilidad de proyectos de energía solar.

A través del desarrollo de este proyecto se logró adquirir conocimiento acerca del impacto que ejercen las variables ambientales sobre la eficiencia de las celdas fotovoltaicas de tecnología monocristalina y policristalina, para la estimación de valores de captación de radiación solar en la ciudad de Bogotá.

Por otro lado, se utilizan habilidades y técnicas aprendidas en el desarrollo de los espacios académicos cursados en la maestría, además de las experiencias profesionales en desarrollo e integración de tecnología.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar e implementar una herramienta de medición que relacione las condiciones ambientales propias de un determinado lugar con la eficiencia de conversión de paneles solares fotovoltaicos del tipo monocristalino y policristalino.

1.3.2 Objetivos específicos

Diseñar e implementar una estación meteorológica donde se registre y almacene mediciones de temperatura, humedad, velocidad del viento, irradiación del sol y pluviometría.

Implementar un sistema de medición de la potencia captada por dos tipos de paneles solares, un panel de tecnología monocristalina y un panel de tecnología policristalina.

Correlacionar la información concerniente a las mediciones hechas de las variables ambientales con las mediciones hechas de la potencia generada por los paneles solares en una base de datos para poder determinar el impacto de los factores ambientales en la captación de energía solar.

Validar la metodología desarrollada para la determinación del impacto de los factores ambientales en la eficiencia de los paneles solares en pruebas de campo donde las condiciones ambientales sean variantes.

1.4 Marco teórico

Para poder comprender el efecto de los factores ambientales y climáticos sobre la eficiencia en la generación de energía solar, se comienza por las definiciones de los conceptos principales que intervienen en un sistema de conversión de energía solar en energía eléctrica. La energía solar se puede transformar en electricidad utilizando el efecto fotovoltaico, el cual consiste en incrementar la conductividad eléctrica de un material semiconductor o dieléctrico bajo la acción de la luz, debido a la generación de portadores de carga libres de electrones y huecos (Jordehi, 2016).

1.4.1 Celda Fotovoltaica

Una celda fotovoltaica es un dispositivo que directamente convierte luz en energía eléctrica basado en el efecto fotovoltaico (Cristian & Raducu, 2014). La mayoría de las celdas fotovoltaicas son hechas de silicio, el cual es el elemento químico más abundante en la naturaleza después del oxígeno. Una celda fotovoltaica consiste de una unión PN, dos electrodos, una red conductiva y un revestimiento anti reflexión.

Una celda solar está hecha básicamente de dos semiconductores, el primero tipo N y el segundo tipo P. El semiconductor tipo N es el componente de la celda que recibirá la luz del

sol, mientras que semiconductor tipo P estará al respaldo de la celda solar. La unión de ambas clases de semiconductores compone la unión PN. Sin embargo, para tener la fotocorriente, es necesario que los fotones incidentes puedan llegar a la región de la unión PN, en la capa de la región de agotamiento, la cual está en el medio de las dos regiones (Matos & Camacho, 2007).

Los tipos de celdas solares hechas a partir del silicio son celdas monocristalinas, celdas policristalinas y celdas amorfas. Las celdas de silicio monocristalinas son las más eficientes, con una eficiencia hasta del 17% pero el proceso de fabricación es costoso y tienen un bajo desempeño en caso de pobre iluminación. Las celdas son cortadas de un cristal de silicio, son rígidas y deben ser montadas en un marco rígido para protegerlas. Las celdas de silicio policristalinas tienen una eficiencia hasta del 13% y un bajo costo de producción. Las celdas son cortadas de un bloque de silicio consistente de un gran número de cristales.

Es importante entender la eficiencia de los paneles solares comprendiendo las diferentes topologías de composición de los paneles fotovoltaicos como se puede apreciar en el artículo de (Cristian & Raducu, 2014), donde se presenta el problema de conversión de energía solar en energía eléctrica usando celdas fotovoltaicas. El estudio matemático de celdas fotovoltaicas podría ser hecho por dos modelos: modelo de diodo simple y modelo de diodo doble. Figuras tomadas de (Cristian & Raducu, 2014).

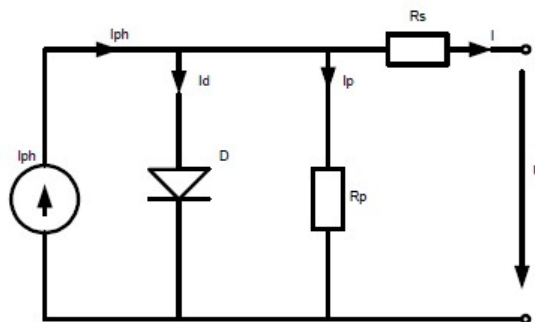


Figura 1 Modelo de diodo simple de una celda fotovoltaica

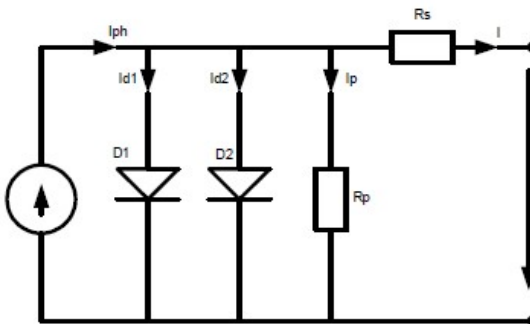


Figura 2 Modelo de diodo doble de una celda fotovoltaica

Conectando en serie varias celdas fotovoltaicas se obtiene un módulo fotovoltaico. Generadores de potencia pequeños son hechos conectando múltiples módulos fotovoltaicos para formar un arreglo fotovoltaico. Los paneles fotovoltaicos pueden ser arreglados en varias configuraciones.

1.4.2 Irradiancia

Además de las características de las celdas solares se deben tener claros los conceptos físicos que intervienen en la conversión de energía solar en eléctrica. La irradiancia es la magnitud usada para describir la radiación solar incidente por unidad de área y es medida en W/m^2 . En un módulo fotovoltaico, la incidencia de radiación solar causa la aparición de corriente foto generada que es directamente proporcional a la irradiancia. En operación de cortocircuito la corriente resultante varía en proporción a la irradiancia. La radiación que entra en la atmosfera presenta pérdidas del 30% debido a la reflexión, por absorción pierde un 19%, el restante llega finalmente a las celdas solares de manera directa o difusa (dos Santos & Vicente, 2011).

La eficiencia de una celda solar viene dada por la relación entre la potencia de salida de la celda P_{out} y la potencia incidente P_{in} , donde P_{in} es el producto de la irradiancia y el área de la celda. En la siguiente ecuación se relaciona la eficiencia de la celda con parámetros dados por el fabricante, como máxima potencia (P_{max}), voltaje de máxima potencia (V_{mp}), corriente de máxima potencia (I_{mp}), voltaje de circuito abierto (V_{oc}), y corriente de corto circuito (I_{sc}).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{mp}V_{mp}}{P_{in}} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}}$$

$$FF = \frac{P_{in}}{I_{sc}V_{oc}}$$

En la anterior ecuación se relaciona también el fill factor (FF), el cuál es la relación entre la máxima potencia y el producto entre la corriente de corto circuito I_{sc} y el voltaje de circuito abierto V_{oc} (Eraso Checa, Erazo de la Cruz, & Escobar Rosero, 2015).

Además del nivel de insolación y la temperatura ambiente, la salida de poder de la celda depende mucho en cuanto a la orientación del panel durante el día. Por lo tanto, el punto máximo de potencia (MPP) depende sobre la orientación del panel que puede ser controlada vía esquemas de control de seguimiento del sol.

La eficiencia de los paneles solares depende directamente de las pérdidas debidas a los factores ambientales, entre ellos la temperatura. Como se ve en (Prudhvi & Chaitanya Sai, 2012), mientras la corriente de cortocircuito incrementa ligeramente con la temperatura, el voltaje de circuito abierto decrece significativamente, cerca de $2.3mV/^{\circ}C$ con el incremento de la temperatura. Esto resulta en reducción de salida de la potencia eléctrica de $0.4\%/^{\circ}C$ a $0.5\%/^{\circ}C$ para celdas solares monocristalinas y policristalinas. Cuando la temperatura del módulo es elevada, hay un decremento en el voltaje y la eficiencia lo cual es expresado por la relación:

$$\eta_{electricity} = \eta_{ref} [1 - \beta (T_{panel} - T_{ref}) + \Phi \log \Phi_{ref}]$$

Donde η_{ref} es la eficiencia referencia del panel en T_{ref} , T_{panel} es la temperatura de la superficie del panel, Φ es la radiación solar en la locación y Φ_{ref} es la radiación solar de referencia de 1000 W/m^2 . La mayoría de estudios de efectos de las condiciones ambientales en la eficiencia de los paneles solares se enfocan en la temperatura. En el estudio (Malta, y otros, 2013) se aprecia claramente como la eficiencia depende de la temperatura, la cual a su vez también depende de otros factores ambientales como el viento y la pluviometría principalmente. Generalmente temperaturas más bajas significan más eficiencia como pueden ser vistas en las siguientes gráficas, donde se relacionan tanto la irradiancia como la temperatura en la potencia obtenida de los paneles solares. Las siguientes figuras fueron tomadas de (Malta, y otros, 2013):

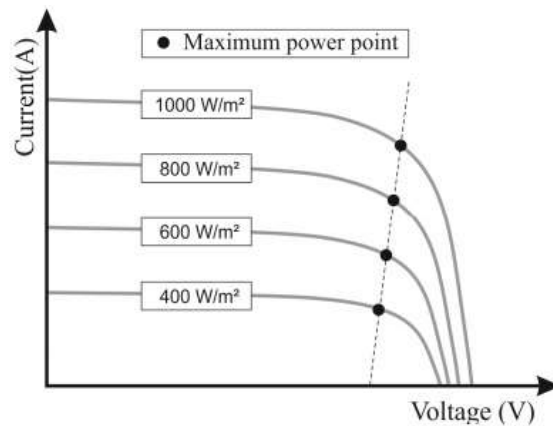


Figura 3 Efecto de la Irradiancia en un panel solar

En la Figura 3 (Malta, y otros, 2013), se aprecia la incidencia de la irradiancia sobre la potencia de la celda, la cual converge en un punto máximo entre la curva de voltaje y corriente.

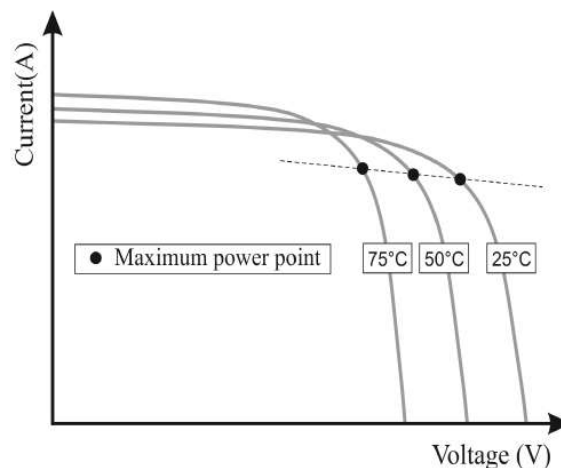


Figura 4 Efecto de la temperatura en un panel solar

En la Figura 4 (Malta, y otros, 2013) vemos el efecto de la temperatura sobre la potencia de la celda fotovoltaica, la cual a medida que aumenta representa en una caída sustancial del voltaje. Actualmente, los módulos solares comerciales tienen una eficiencia de conversión que van desde 12 a 17 por ciento. Sin embargo, la eficiencia de un sistema fotovoltaico puede ser severamente reducida si los módulos no están operando bajo condiciones ideales (1000W/m^2 y 25°C). El desempeño de estos sistemas depende principalmente sobre la irradiancia y la temperatura como podemos ver en el artículo (dos Santos & Vicente, 2011).

De acuerdo a un estudio publicado por (L.Rajaji, 2014), el principal problema involucrado en la utilización de energía solar es la baja eficiencia de conversión fotovoltaica y el alto costo de los paneles. Los objetivos en este estudio fue incrementar la eficiencia de celdas fotovoltaicas y reducir el costo del módulo fotovoltaico. La eficiencia de un módulo fotovoltaico se puede incrementar cubriendo un ángulo cercano a los 180° , de manera que la radiación del sol converge a lo largo del día desde todos los ángulos hacia un módulo fijo plano. El costo es reducido usando un recubrimiento económico para el modulo y cubriendo un área más amplia para la radiación. Todo esto es logrado a través del uso de un arreglo tres lentes para lograr un concentrador de mayor potencia.

1.4.3 Pluviómetro

A través de la pluviometría se estudia la información de precipitación o caída de lluvia en un determinado lugar. En aplicaciones para pronóstico del tiempo, deslizamiento de tierra e inundaciones entre otras, la información de la intensidad de la lluvia es de vital importancia para estimar la cantidad de lluvia y cantidad de agua que fluye sobre una determinada área. Un indicador de lluvia “*tipping bucket*” es ampliamente usado en mediciones de lluvia de estaciones en tierra. Varios tipos de indicadores de lluvia han sido desarrollados, tales como indicadores por peso de lluvia, indicadores por capacitancia indicadores “*tipping bucket*” o cubo basculante, indicadores ópticos de lluvia, sensores acústicos bajo el agua y otros. Sin embargo, el más utilizado en bases en tierra es el “*tipping bucket*” debido a su tamaño compacto, menos componentes, alta confiabilidad y facilidad para instalar en áreas remotas.

Normalmente este pluviómetro (*tipping bucket*), es diseñado en forma de cono, el cual tiene una entrada en la parte superior y una pequeña salida en el fondo. Los dos cubos basculantes son instalados en el fondo del cono. El principio de operación es simple, la lluvia es recolectada por uno de los cubos que esta fijo hacia la entrada, el cual cuando se llena se inclina hacia abajo derramando el agua y permitiendo que el otro cubo suba hasta que se llene. Cada cubo se llena a una medida de agua determinada, por lo tanto, esta es la cantidad de lluvia que va quedando registrada. (Lewlomphaisarl & Saengsatcha, 2012).

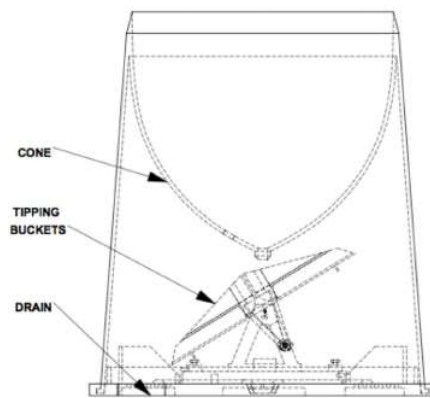


Figura 5 Pluviómetro Tipping Bucket

1.4.4 Anemómetro

Un anemómetro es un instrumento que se utiliza en la medición de velocidad y dirección del viento en campos como la aviación, la meteorología y la agricultura.

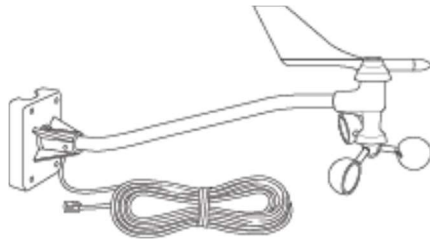


Figura 6 anemómetro mecánico

El anemómetro de copa es el tipo más común de anemómetro mecánico. La parte de inducción del anemómetro consiste de tres copas hemisféricas con tres brazos que las soportan y están separadas 120° cada una. La energía cinética del viento pasa por las tres copas del anemómetro el cual cuenta con un sensor que está compuesto de partes rotantes. Debido a que la presión sobre las superficies cóncavas y convexas de las copas causada por el viento no es igual, las copas empiezan a rotar bajo torsión y hay cierta relación entre su rotación y la velocidad del viento. Por medio de la rotación de las copas y a través de un fototransistor bajo una rueda dentada se puede registrar la velocidad del viento. El sensor de dirección del viento generalmente es acoplado a través de una veleta a un potenciómetro que da una señal proporcional a la dirección según la rosa de los vientos. (Lihua & Dawei, 2014).

1.4.5 Monitoreo de Potencia Eléctrica

El monitoreo de potencia es necesario para caracterizar fenómeno electromagnéticos en una locación particular sobre un circuito de potencia eléctrica. Los objetivos de monitorear un proyecto particular determinará la elección del equipo de monitoreo, el método de colección de datos, la técnica de análisis de datos a emplear y el nivel de esfuerzo requerido del

proyecto. Los datos obtenidos necesitan solo cumplir con los objetivos de las tareas de monitoreo para ser exitosos. Monitoreo evaluativo o predictivo puede requerir la colección de varios tipos de parámetros de corriente y voltaje para caracterizar el nivel de calidad de potencia. (IEEE 1159, 2009)

El voltaje y la corriente son las dos principales mediciones para el fenómeno de calidad de potencia. La mayoría de instrumentos usan conversores de análogo a digital que muestrean y almacenan las formas de onda del voltaje y la corriente. Estos datos pueden ser usados para computar algún número de parámetros deseados, el más básico del cual es el valor rms para cada ciclo. Hay pocos medidores digitales que usan un sensor de pico o promedio. Un medidor promedio es calibrado para mostrar 1.11 veces el voltaje promedio rectificado y el medidor de pico es calibrado para medir 0,707 veces el voltaje pico, lo cual también puede ser impreciso en presencia de distorsión. (IEEE 1159, 2009)

Las mediciones eléctricas y la calibración del instrumento de medida son dos aspectos fundamentales de la industria. Los requerimientos de calibración deben ser de acuerdo a los objetivos de monitoreo y la naturaleza de la carga. Si los usuarios están midiendo voltaje sobre la especificación ANSI C84.1 la tolerancia es $\pm 5\%$ en estado estable. (IEEE 1159, 2009)

1.4.6 Análisis de Componentes Principales PCA

Para analizar el impacto que tienen las diferentes variables climáticas sobre la eficiencia de los paneles fotovoltaicos, tanto monocristalinos como policristalinos, se hace uso de una técnica estadística multivariable llamada PCA. El PCA por sus siglas en inglés (*Principal Components Analysis*) es una técnica estadística que toma datos y los transforma de tal manera que los nuevos datos tienen propiedades estadísticas. Las propiedades estadísticas son elegidas de manera que la transformación resalta la importancia de los elementos de los datos. Por lo tanto, los datos transformados pueden ser usados para clasificación observando componentes importantes de los datos.

Los datos también pueden ser reducidos o comprimidos eliminando o filtrando los elementos menos importantes. (Mark Nixon, Feature Extraction & Image Processing for Computer Vision, 2012). El PCA está basado en la búsqueda de combinaciones lineales de elementos de un vector X para encontrar una combinación con la varianza más grande. Los componentes principales son derivados de los valores y vectores propios de la matriz de covarianza $\text{Var}X$. El número de componentes principales significantes es elegido con el 90% por lo menos de la varianza de X . (Jana Heckenbergerova, 2015).

El PCA es también conocida por ser una técnica para análisis de datos exploratorios que básicamente proyecta datos en un hiperespacio reducido definido por componentes principales ortogonales. Estos componentes son combinaciones lineales de variables originales, donde el primer componente principal tiene la varianza más grande, el segundo componente principal la segunda varianza más grande y de este modo los demás componentes. Por lo tanto, es posible seleccionar un número significativo de componentes

de tal manera que la dimensión de los datos es reducida preservando la variación sistemática en los datos retenidos en el primer componente principal, mientras que el ruido es excluido representado en los últimos componentes. Por lo tanto, el PCA mejora y facilita la exploración de datos y la interpretación de conjunto de datos multivariable (Ballabio, 2015).

A continuación, se presenta el procedimiento matemático según (Mark Nixon, 2012) para determinar los componentes principales a partir de un conjunto de datos X :

Generalmente los datos son representados por un conjunto de m vectores

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$$

Cada vector X_i tiene n elementos o características

$$X_i = [X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,m}]$$

Se pueden agrupar características tomando los elementos de cada vector. El vector k para el conjunto de datos X se puede definir como

$$C_{X,k} = \begin{bmatrix} X_{1,k} \\ X_{2,k} \\ \dots \\ X_{m,k} \end{bmatrix}$$

Se pueden agrupar todas las características en la matriz característica considerando cada vector $C_{X,k}$ para estar como una columna en una matriz

$$C_X = [C_{X,1}, C_{X,2}, \dots, C_{X,n}]$$

La técnica PCA transforma los vectores $C_{X,k}$ para definir nuevos vectores, definiendo componentes con mejores capacidades de clasificación. PCA asegura que se destaquen los datos que cuentan para la máxima variación medida por la covarianza. La covarianza mide la dependencia lineal entre dos variables aleatorias. La covarianza entre características puede ser definida considerando el componente de cada vector. Si $X_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}\}$, entonces la covarianza es

$$\sigma_{X,1,2} = E[(C_{X,1} - \mu_{X,1})(C_{X,2} - \mu_{X,2})]$$

La multiplicación es elemento por elemento y $E[\cdot]$ denota la expectativa, la cual es aproximadamente el valor promedio de los elementos del vector. $\mu_{X,k}$ es un vector que contiene el valor medio en cada elemento. La definición de covarianza puede expresarse en forma de matriz como

$$\sigma_{X,1,2} = \frac{1}{m} ((C_{X,1} - \mu_{X,1})^T (C_{X,2} - \mu_{X,2}))$$

Donde T denota la matriz traspuesta. Los valores de covarianza varían desde cero (indicando que no hay relación) a valores más grandes positivos y negativos que reflejan fuertes dependencias. Cuando los datos tienen más de dos dimensiones la covarianza puede ser definida considerando cada par de componentes. Estos componentes están generalmente representados en una matriz llamada matriz de covarianza definida como

$$\Sigma_X = \begin{bmatrix} \sigma_{X,1,1} & \sigma_{X,1,2} & \dots & \sigma_{X,1,n} \\ \sigma_{X,2,1} & \sigma_{X,2,2} & \dots & \sigma_{X,2,n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sigma_{X,n,1} & \sigma_{X,n,2} & \dots & \sigma_{X,n,n} \end{bmatrix}$$

La matriz de covarianza da información importante acerca de los datos, por ejemplo, observando los valores cercanos a cero características independientes útiles para la clasificación. El PCA busca una transformación W que mapee cada vector característico definido en el conjunto de datos X en otro vector característico para el conjunto Y, tal que la matriz de covarianza de los elementos en Y sea diagonal. La transformación es lineal y está definida como

$$c_Y = c_X W^T$$

O de una manera grafica

$$\begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \dots & y_{1,n} \\ y_{2,1} & y_{2,2} & \dots & y_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y_{m,1} & y_{m,2} & \dots & y_{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m,1} & x_{m,2} & \dots & x_{m,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{2,1} & \dots & w_{n,1} \\ w_{1,2} & w_{2,2} & \dots & w_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{1,n} & w_{2,n} & \dots & w_{n,n} \end{bmatrix}$$

Se puede ver que

$$c_Y^T = W c_X^T$$

$$\begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \dots & y_{m,1} \\ y_{1,2} & y_{2,2} & \dots & y_{m,2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y_{1,n} & y_{2,n} & \dots & y_{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,n} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & w_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{n,1} & w_{n,2} & \dots & w_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} & \dots & x_{m,1} \\ x_{1,2} & x_{2,2} & \dots & x_{m,2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{1,n} & x_{2,n} & \dots & x_{m,n} \end{bmatrix}$$

Para obtener la covarianza de características en Y basado en las características en X, se substituye c_Y en c_Y^T en la definición de la matriz de covarianza

$$\Sigma_Y = \frac{1}{m} [(W c_X^T - E[W c_X^T])(c_X W^T - E[c_X W^T])]$$

Después de factorizar W se tiene

$$\Sigma_Y = \frac{1}{m} [W (C_X - \mu_X)^T (C_X - \mu_X) W^T]$$

$$\Sigma_Y = W \Sigma_X W^T$$

Se puede usar esta ecuación para encontrar la matriz W tal que Σ_Y sea diagonal. Hasta este punto se definió una transformación de las características en X en un nuevo conjunto Y cuya matriz de covarianza es diagonal. Para mapear Y en X se debe usar la inversa de la transformación y esto se simplifica ya que la inversa de la transformación es igual a su traspuesta.

$$W^{-1} = W^T$$

Esta definición puede ser comprobada considerando que

$$\Sigma_X = W^{-1} \Sigma_Y (W^T)^{-1}$$

Ya que la covarianza es simétrica $\Sigma_X = \Sigma_X^T$ y

$$W^{-1} \Sigma_Y (W^T)^{-1} = (W^{-1})^T \Sigma_Y ((W^T)^{-1})^T$$

Lo cual implica

$$W^{-1} = (W^{-1})^T \text{ y } (W^T)^{-1} = ((W^T)^{-1})^T$$

Las ecuaciones pueden ser únicamente verdaderas si la inversa de W es igual a su traspuesta. Entonces puede ser escrita como

$$W^{-1} c_Y^T = W^{-1} W c_X^T$$

$$W^T c_Y^T = c_X^T$$

Considerando

que

$$\begin{aligned} W^{-1} &= W^T \\ \Sigma_X W^T &= W^T \Sigma_Y \end{aligned}$$

Se puede escribir el lado derecho de una manera grafica

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{2,1} & \dots & w_{n,1} \\ w_{1,2} & w_{2,2} & \dots & w_{n,2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{1,n} & w_{2,n} & \dots & w_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n \end{bmatrix} \\ &= \lambda_1 \begin{bmatrix} w_{1,1} \\ w_{1,2} \\ \vdots \\ w_{1,n} \end{bmatrix} + \lambda_2 \begin{bmatrix} w_{2,1} \\ w_{2,2} \\ \vdots \\ w_{2,n} \end{bmatrix} + \dots + \lambda_n \begin{bmatrix} w_{n,1} \\ w_{n,2} \\ \vdots \\ w_{n,n} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Los elementos diagonales de la covarianza son nombrados λ usando la notación de algebra de matrices. Similarmente para el lado izquierdo de la ecuación se tiene:

$$\Sigma_X W^T = \Sigma_X \begin{bmatrix} w_{1,1} \\ w_{1,2} \\ \vdots \\ w_{1,n} \end{bmatrix} + \Sigma_X \begin{bmatrix} w_{2,1} \\ w_{2,2} \\ \vdots \\ w_{2,n} \end{bmatrix} + \cdots + \Sigma_X \begin{bmatrix} w_{n,1} \\ w_{n,2} \\ \vdots \\ w_{n,n} \end{bmatrix}$$

Uniendo los dos lados

$$\begin{aligned} & \Sigma_X \begin{bmatrix} w_{1,1} \\ w_{1,2} \\ \vdots \\ w_{1,n} \end{bmatrix} + \Sigma_X \begin{bmatrix} w_{2,1} \\ w_{2,2} \\ \vdots \\ w_{2,n} \end{bmatrix} + \cdots + \Sigma_X \begin{bmatrix} w_{n,1} \\ w_{n,2} \\ \vdots \\ w_{n,n} \end{bmatrix} \\ &= \lambda_1 \begin{bmatrix} w_{1,1} \\ w_{1,2} \\ \vdots \\ w_{1,n} \end{bmatrix} + \lambda_2 \begin{bmatrix} w_{2,1} \\ w_{2,2} \\ \vdots \\ w_{2,n} \end{bmatrix} + \cdots + \lambda_n \begin{bmatrix} w_{n,1} \\ w_{n,2} \\ \vdots \\ w_{n,n} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Por lo tanto, se obtiene que W puede ser hallado resolviendo la siguiente ecuación

$$\Sigma_X w_i = \lambda_i w_i$$

λ_i define el valor propio (*eigenvalue*) y w_i define los vectores propios (*eigenvectors*). Para determinar w_i y λ_i primero se deberá notar que $w_i \lambda_i = \lambda_i I w_i$, donde I es la matriz identidad. Por lo tanto, se puede escribir como

$$\begin{aligned} \lambda_i I w_i - \Sigma_X w_i &= 0 \\ (\lambda_i I - \Sigma_X) w_i &= 0 \end{aligned}$$

Una solución trivial es obtenida por w_i igual a cero. Otra solución existe cuando el determinante *det* es dado por

$$\det(\lambda_i I - \Sigma_X) = 0$$

Esta es conocida como la ecuación característica y es usada para resolver los valores de λ_i . Una vez los valores de λ_i son conocidos pueden ser usados para obtener los valores de w_i . De acuerdo a las formulaciones anteriores cada λ_i es relacionado a un w_i . Sin embargo, varios λ_i pueden tener el mismo valor. Por lo tanto, cuando un valor λ_i es reemplazado en $(\lambda_i I - \Sigma_X) w_i = 0$, la solución deberá ser determinada combinando todos los vectores independientes obtenidos para todos los λ_i . De acuerdo a las formulas planteadas anteriormente una vez los vectores propios (*eigenvectors*) son conocidos, la transformación W es obtenida considerando w_i como sus columnas.

1.5 Estado del arte

En el estado del arte del estudio de la eficiencia de paneles solares, de acuerdo a los materiales de construcción, técnicas de fabricación y factores ambientales, se cuenta con varios artículos y estudios que podemos tomar como referencia para el desarrollo del proyecto.

El estudio que se realizó a través de la implementación de la estación meteorológica se enfocó principalmente en los tipos de paneles solares mayormente utilizados en la industria (policristalinos y monocristalinos), así como en la influencia de factores ambientales y climáticos en su eficiencia.

Como trabajo de investigación relacionado con el desarrollado en este proyecto, se encontró un trabajo realizado en la ciudad de Pasto (Eraso Checa, Erazo de la Cruz, & Escobar Rosero, 2015), en el cual se presenta la relación entre la irradiancia en la ciudad de Pasto y la potencia generada por los tipos de paneles monocristalinos y policristalinos. La información de la irradiancia es recopilada con una estación meteorológica comercial. Las potencias generadas por los paneles fotovoltaicos fueron monitoreadas usando un sistema de adquisición, almacenándola en una base de datos para representarla gráficamente con un software de análisis de variables, todo esto para obtener un modelo que predice el posible comportamiento de la salida de potencia generada por cada una de las tecnologías concerniente a la irradiancia obtenida en la ciudad de Pasto.

Otro trabajo de investigación acerca del impacto de los factores ambientales sobre la eficiencia de paneles solares fue hecho en Malasia (Mariam & Husni, 2006), donde se ve que la eficiencia es altamente influenciada por la variación del clima. Esta investigación intento encontrar la relación entre la eficiencia solar y el clima en Malasia. La salida de corriente y voltaje del panel solar fue registrada durante una semana las 24 horas del día. Estos datos fueron usados para obtener la eficiencia del panel solar. Al mismo tiempo los parámetros del clima fueron registrados usando una estación climática. La correlación y regresión de las pruebas fueron hechas para obtener la relación matemática entre estos parámetros climáticos y la eficiencia de las celdas solares. Los resultados mostraron la influencia de parámetros climáticos como la temperatura, irradiación, humedad y velocidad del viento en celdas solares policristalinas.

En los países de medio oriente la energía solar ha tomado una importancia relevante de manera que se han adelantado estudios de la afectación de sus condiciones climáticas áridas en la captación de energía solar, como se plantea en la investigación (Touati, Al-Hitmi, & Bouchech, 2012), donde se estudia la sensibilidad de varias tecnologías de celdas solares fotovoltaicas a factores climáticos como el polvo, la temperatura y la humedad relativa del clima de Qatar. Resultados obtenidos muestran que las celdas fotovoltaicas monocristalinas tienen eficiencias más altas comparadas con las celdas fotovoltaicas policristalinas. También se muestra que la acumulación de polvo degrada más la eficiencia de celdas monocristalinas que la temperatura del panel o la humedad relativa.

El efecto de los factores ambientales también se encuentra en el trabajo de (Sandhya, Starbell, & Wessley, 2015), donde se puede encontrar que la mayoría de la radiación solar incidente

sobre una celda fotovoltaica no es convertida a electricidad, sino que es convertida en calor, incrementando la temperatura del panel y por lo tanto reduciendo la eficiencia del panel. Por lo tanto, se vuelve esencial contar con un sistema de enfriamiento que reduzca la temperatura mientras incrementa la eficiencia del panel. El efecto de la temperatura sobre la eficiencia fotovoltaica para celdas solares cristalinas converge en una reducción en la eficiencia de conversión entre 0.4 a 0.5 % por cada grado de temperatura subido.

El impacto de las condiciones climáticas y ambientales no solamente se refleja en la eficiencia de los paneles solares, sino que también se ve reflejada en el nivel de degradación de los mismos. En el trabajo de (Campbell, Zemen, Richardson, & Striner, 2012) se destaca que para diferentes condiciones climáticas se deben tener diferentes soluciones en tecnologías de captación de energía solar. Factores regionales tales como la irradiancia, temperatura, humedad y polvo afecta el desempeño de los módulos fotovoltaicos en diferentes maneras, y la optimización de un sistema variara de región a región (Campbell, Zemen, Richardson, & Striner, 2012). En este estudio se diseña una red de pruebas en tres ciudades (Tucson-USA, Berlín-Alemania y Carmignano-Italia) para comparar el desempeño y degradación de módulos fotovoltaicos en tres distintas regiones climáticas. Las tecnologías de paneles probadas incluyen policristalinas y monocristalinas, aunque la mayoría de estos sitios están compuestos por paneles monocristalinos.

Algunos estudios se enfocan solo en algunos factores ambientales sobre la eficiencia de la energía solar, tal como el polvo y la polución del aire sobre los paneles, como se ve (Maghami, Hizam, & Gomes, 2014). Para evaluar el efecto del polvo y la polución sobre las celdas fotovoltaicas fueron instalados en la Universidad Putra de Malasia dos arreglos de paneles, uno que fue continuamente limpiado y otro que no se limpió durante la investigación. Los datos fueron recopilados en intervalos de cada 30 minutos desde el primero de abril hasta el cinco de diciembre del 2013 para ambos arreglos. El hallazgo de esta investigación mostró la pérdida de potencia y energía debido al polvo acumulado en la superficie del arreglo de celdas fotovoltaicas. La evaluación de la pérdida de potencia fue hecha en un clima tropical donde se contemplaron varios días de lluvia.

Como podemos ver en el artículo (Melis & Mallick, 2014), la eficiencia en la salida de un panel solar está determinada por varios factores, principalmente en el tipo de panel que determina la eficiencia de conversión, así como también en la cantidad de luz que cae sobre el panel. La salida de energía del panel cae cuando la cantidad de luz es reducida o cuando una parte del panel es cubierta. Otra razón para la reducción en la salida del panel recae sobre el hecho que la eficiencia de la conversión cae cerca de 0.38% por grado centígrado a medida que incrementa la temperatura del panel. Se considera que un panel puede producir más energía en un día soleado, aunque la reducción en la eficiencia debido al calentamiento es de importancia significativa. Para alcanzar una salida optimizada es importante que el panel permanezca limpio, pero también mantenerlo frío tanto como sea posible. Con todo esto vemos la importancia de considerar las condiciones ambientales a la hora de evaluar la eficiencia entre los diferentes tipos de paneles solares.

Diferentes tipos de investigaciones y sistemas se han desarrollado para determinar la influencia de las condiciones ambientales en la captación de energía solar. En (Dustegor & Felemban, 2013) se resalta que el desempeño de los sistemas fotovoltaicos depende altamente de las condiciones ambientales, y en la mayoría de los casos no hay información relevante para implementar decisiones. Esto es debido a que el monitoreo de estos sistemas es muy esencial para la evaluación inicial y la continua optimización del sistema. En este trabajo se propone una red de sensores inalámbricos para monitorear las variables ambientales alrededor de los paneles, tales como temperatura, humedad, polvo y velocidad del viento.

El efecto de la temperatura y el viento sobre las celdas fotovoltaicas es muy importante, como podemos ver en el estudio de (Ajdid, Ouassaid, & Maaroufi, 2015) acerca de la respuesta de paneles fotovoltaicos policristalinos en climas como el de Marruecos. En este estudio se toma en cuenta el potencial solar de tres regiones en Marruecos. El estudio estima la salida de potencia del panel fotovoltaico tomando en consideración la temperatura y el efecto del viento especialmente con paneles fotovoltaicos policristalinos. Las regiones escogidas representan tres diferentes zonas climáticas y debería dar a los investigadores una fotografía real del potencial energético de Marruecos. La investigación concierne a las celdas fotovoltaicas de silicio policristalinas, representando la tecnología más presente en el mercado (42.5% en el 2006).

Algunos estudios además de contemplar el efecto de los factores climáticos en la captación de energía solar, también tienen en cuenta los efectos del impacto humano en el medio ambiente. Como se puede ver en el estudio hecho en la ciudad de Cracovia (Hudy, Kazimierz, & Krzysztof, 2015) el cual fue basado en un análisis basado en datos meteorológicos y antropogénicos relativos a la insolación y polución atmosférica sobre el área seleccionada. El alcance de este trabajo fue limitado a tres tipos de paneles solares. Basados en el estudio fue observado que los paneles fotovoltaicos entregaron diferentes patrones de energía desde la radiación solar dependiendo no únicamente del clima sino también en condiciones antropogénicas. Las diferencias negativas observadas son más notables en tiempo de invierno. En este estudio se llevaron a cabo mediciones de radiación solar, polución del aire y condiciones atmosféricas. Se modeló un panel fotovoltaico en cuyas características de corriente y voltaje resultaron de observaciones de condiciones ambientales. Se calculó la cantidad de energía posible producida y se comparó con la energía producida con factores antropogénicos.

La influencia de los factores ambientales en la captación de energía solar se puede apreciar claramente en el artículo (Chamaria & Dube, 2014), donde se ve como el efecto del polvo sobre módulos fotovoltaicos reduce su eficiencia reduciendo su transmitancia ya que la insolación alcanzada es limitada. Estudios han mostrado que el polvo es afectado por el ángulo de inclinación del panel solar, el periodo de exposición, condiciones climáticas del sitio, movimiento del viento y propiedades del mismo polvo. Autores previamente han calculado términos de pérdida óptica que es reducción en la transmitancia. Adicionalmente estudios recientes han demostrado la influencia de las condiciones ambientales en el desempeño de paneles solares de silicio como se puede apreciar en el artículo de Alessandro Virtuani (Virtuani, Skoczek, & Strepparava, 2015).

Debido a que en el presente estudio que se hace acerca del impacto que tienen las variables climáticas sobre la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos, se hace uso de una herramienta estadística PCA (Análisis de Componentes Principales), se consultaron algunas investigaciones donde se encontraron trabajos que también hicieron uso del PCA para determinar el impacto de variables climáticas sobre ciertos fenómenos.

En el campo de la energía eólica, que al igual que la energía solar es una fuente renovable e inagotable y depende de las condiciones climáticas y ambientales, se encontró un trabajo hecho a partir de análisis de componentes principales (Heckenbergerova, Musilek, Marek, & Rodway, 2014), para evaluar la probabilidad de un evento de rampa de viento, las cuales causan un cambio repentino en la salida de potencia de las fuentes de energía eólicas. En este trabajo se sugiere analizar las series de potencia real de viento u otros parámetros del clima buscando por parámetros y dependencias específicas señalizando eventos de rampa de vientos próximos. En este trabajo a través del PCA se analizó la producción de potencia y velocidad del viento desde agosto del 2011 hasta julio de 2012 en una granja de viento cerca de Lethbridge Canadá. Las tablas de frecuencia para los primeros tres primeros componentes principales son usados para evaluar probabilidad condicional de eventos de rampa de vientos próximos.

Otra investigación complementaria acerca de las rampas de viento que hizo uso de la técnica estadística PCA se encuentra en (Heckenbergerova, Janata, Musilek, & Wang, 2015). Este trabajo también está enfocado en la energía eólica y específicamente en las rampas de viento, donde contemplan las rampas de viento como un gran obstáculo para la integración eficiente de las fuentes eólicas, debido al cambio dramático de la potencia generada debido a los cambios de la velocidad del viento. La mayoría de métodos de predicción de rampas se deriva de estimaciones de rampas futuras desde series de pronósticos de potencia. Este trabajo sugiere un enfoque diferente que analizaría directamente las series de tiempo de potencia del viento y otros parámetros del clima. En este documento tablas 3D de probabilidades condicionales de eventos de rampas son evaluadas usando análisis de componentes principales.

1.6 Metodología

La investigación empieza a partir de la definición del problema acerca de la influencia de los factores climáticos en la eficiencia de la captación de energía solar de paneles fotovoltaicos, donde se desarrolló el estado del arte enfocándose en los estudios e investigaciones que se han llevado a cabo en diferentes partes del mundo, en países tales como Catar, Malasia y Marruecos entre otros, para determinar el impacto de los factores climáticos propios de cada región para poder determinar su potencial energético solar.

Así mismo se determina las principales tecnologías en fabricación de paneles solares fotovoltaicos que se utilizan comercialmente, como lo son la tecnología monocristalina y la tecnología policristalina, sobre los cuales se enfocan todos los estudios consultados de la influencia del clima en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos.

Una vez definidas las tecnologías de paneles solares y las variables a tener en cuenta que pueden impactar en la eficiencia, se hizo un diseño conceptual de la plataforma que permitió implementar la investigación. En este diseño conceptual se determinó por medio de bloques las principales interfaces que permitirían capturar y procesar la información pertinente al estudio.

A partir del diseño conceptual se procedió a la selección de los componentes físicos, tales como plataformas de hardware y sensores que comprenderían tanto la estación meteorológica como la interfaz de medición de potencia. Toda esta selección de componentes y dispositivos se llevó a cabo en un diseño detallado donde se presentaron todas las especificaciones técnicas y criterios de selección. La selección de los componentes de todo el sistema permitió realizar un diseño de hardware y software para llegar a una implementación física de toda la solución.

A partir del diseño detallado se procedió a la implementación, donde se adquieren los componentes de hardware y se integran en una plataforma donde se realiza un programa de software que permite la adquisición y procesamiento de todas las variables del sistema, como son las variables climáticas y de potencia de los paneles.

Una vez se implementaron, tanto la estación meteorológica como la interfaz de medición de potencia, se pasa a una fase de pruebas donde se adquieren los registros necesarios para el análisis de la influencia de las variables climáticas en la eficiencia de los paneles solares, tanto de tecnología monocristalina como de tecnología policristalina. Se estimó un periodo de 30 días de toma de registros donde se pudieron apreciar variaciones significativas en las variables climáticas afectando la potencia generada por los paneles solares. A partir del registro de la información se procede a hacer un estudio del impacto de las variables y se formula una metodología a través de la herramienta estadística PCA (Análisis de Componentes Principales) para determinar la relación de la potencia generada de los paneles solares en las condiciones climáticas registradas.

2. Diseño

Para llevar a cabo la investigación sobre la influencia de los factores climáticos sobre la eficiencia de las dos tecnologías principales de paneles solares fotovoltaicos (monocristalina y policristalina), se diseñó una plataforma que permite capturar y registrar tanto las variables climáticas como la potencia captada y generada por los paneles solares. Para lo anterior se seleccionan dos paneles solares de similares características (las cuales se relacionan en el diseño detallado), de la misma potencia generada, pero de tecnología diferente, uno monocristalino y otro policristalino.

Para registrar la potencia entregada por los paneles solares se diseña una interfaz que permite medir tanto la corriente y voltaje de salida de cada uno de los paneles. Por otro lado, para registrar y procesar las variables climatológicas se diseña una estación meteorológica que además también procesa la información procedente de la interfaz de medición de potencia y la almacena con las variables climatológicas para generar un archivo de registros sobre los que se basó el estudio de la influencia de las variables climáticas sobre la eficiencia de los paneles.

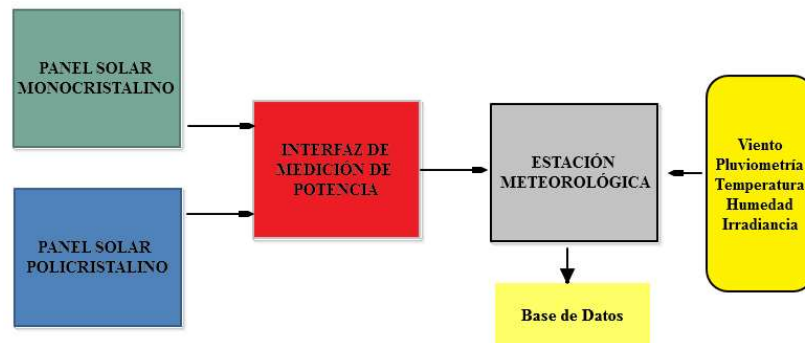


Figura 7 Diseño conceptual plataforma de medición

La estación meteorológica se diseñó a partir de una plataforma de hardware que permite integrar y procesar la información procedente de los sensores de las variables climáticas, tales como irradiancia, temperatura, humedad, viento y pluviometría. Esta plataforma de hardware cuenta con entradas análogas, entradas digitales y con puertos de comunicación serial RS232 y RS485 para acondicionar las señales procedentes de los sensores de irradiancia, temperatura, humedad, pluviometría y velocidad del viento.

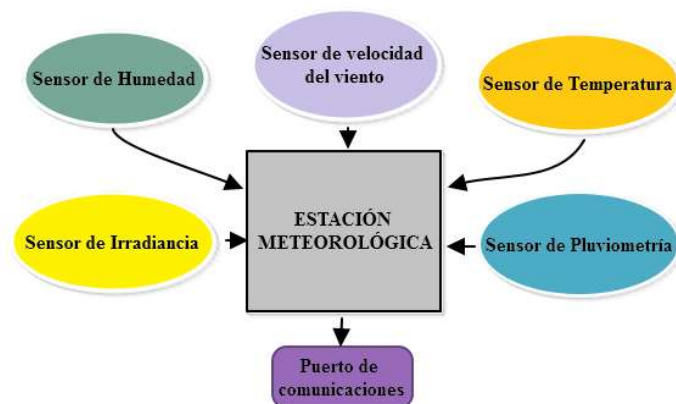


Figura 8 Esquema conceptual estación meteorológica

Adicionalmente la estación cuenta con un puerto de comunicación serial RS232 para recibir la información procedente de la Interfaz de medición de potencia de salida de los paneles solares monocristalino y policristalino. Esta plataforma de hardware cuenta con gran capacidad de procesamiento y de almacenamiento (32 MB de memoria RAM y 32 MB de memoria Flash) para llevar a cabo el registro y procesamiento de tanto de las variables climáticas como de la potencia de salida de los paneles solares durante el lapso de pruebas del sistema. Por otro lado, la Interfaz de Medición de Potencia acopla y procesa las señales provenientes de un sensor de corriente y de voltaje (V/C) que se ubica entre los paneles y una carga tipo led de 10W a 12 V cuyo consumo de potencia es constante y que exige potencia de salida tanto al panel monocristalino como al policristalino. La potencia es medida a la salida de los paneles solares directamente.

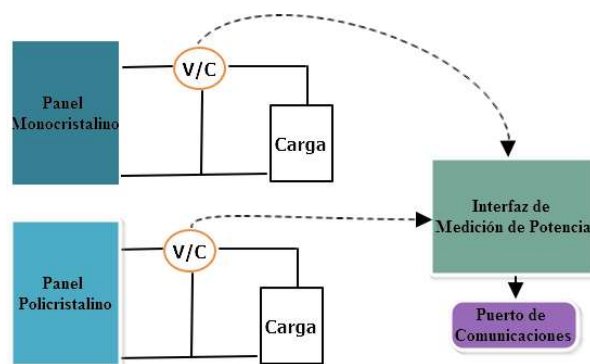


Figura 9 Esquema Interfaz de Medición de Potencia

Tanto la información de la estación meteorológica como la de la interfaz de medición de potencia se correlacionan en un registro que contiene una marca de tiempo, el valor de cada variable climática y los valores de corriente y voltaje de cada panel, como se muestra en la siguiente tabla:

Tiempo dd/mm/aa hh:mm:ss	Viento m/s	Pluv mm	Irrad W/m ²	Humed %	Temp °C	Vp1 V	Cp1 mA	Vp2 V	Cp2 mA
15/10/16 08:10:29	10	0.2	127	50	22	13,1	2,30	13,4	2,32

Tabla 1 Estructura de registro de variables

Tiempo: fecha y hora del registro de las variables.

Viento: Velocidad del viento dada en metros por segundo.

Pluv: Valor de la pluviometría en milímetros de lluvia.

Temp: Valor de la Temperatura en grados Celsius.

Hum: Valor porcentual de la humedad relativa.

Irrad: Valor de la Irradiancia en vatios sobre metro cuadrado W/m².

Vp1: Voltaje de salida de panel policristalino en voltios.

Cp1: Corriente de salida de panel policristalino en miliamperios.

Vp2: Voltaje de salida de panel monocristalino en voltios.

Cp2: Corriente de salida de panel monocristalino en miliamperios.

Los registros donde se correlacionan las variables ambientales y la potencia de los paneles solares fueron tomados cada 2 minutos, esto debido a que en este intervalo de tiempo las variaciones de las variables ambientales no son grandes. Lo anterior se verifico después de registrar durante un día el comportamiento de las variables y verificando que variables como la humedad relativa con un valor máximo de 100% tuvo una desviación estándar apenas de 0,61.

Sin embargo, los valores registrados cada 2 minutos no son muestras únicas, para el caso de la pluviometría el valor registrado corresponde a la cantidad de lluvia caída durante los 2 minutos, para el caso de la velocidad del viento el valor registrado corresponde a la máxima velocidad alcanzada durante los 2 minutos, y para las variables de irradiancia, humedad, temperatura, corriente y voltaje de los paneles el valor registrado es el valor medio tomado cada segundo.

2.1 Estación Meteorológica

2.1.1 Plataforma

Para el bloque de la estación meteorológica se seleccionó la plataforma de Hardware Owasys Owa33. Para seleccionar la plataforma para la estación meteorológica, se compararon 3 modelos de plataforma de hardware, una plataforma Raspberry pi 2, una plataforma Arduino YUN y la plataforma Owasys Owa33. En el siguiente cuadro se presentan las principales características de las 3 unidades para tener parámetros de comparación que justifican la elección de la plataforma Owasys.

Plataforma			
Nombre	Owasys Owa33	Raspberry pi 2	Arduino YUN
Procesador	ARM9 CPU 32bit 400MHz	ARM7 CPU 32bit 900MHz	AtherosAR9331 400MHz
Memoria RAM	32 Mbyte	1 GByte	64 MByte
Memoria FLASH	32 Mbyte	No (SD Card)	16 MByte
Puertos RS232	3	1(TTL)	1 (TTL)
Puertos RS485	1	0	0
Puerto I2C	0	1	1
Entradas Digitales	6	22	6
Entradas Análogas	4	0	6
Puertos USB	2	2	1
Ethernet	1	1	1
GSM	Si	No	No
GPS	Si	No	No

Tabla 2 Comparativo plataforma de estación meteorológica

Una de las especificaciones que hacen más convenientes la elección de la plataforma Owa33 para la estación meteorológica, es que, a diferencia de las otras dos plataformas, cuenta con un puerto RS485, que permite la conexión de sensores que cuentan con este puerto. Adicionalmente esta plataforma cuenta también con canales análogos y digitales para la conexión de sensores de estos tipos de señal, mientras que por ejemplo la plataforma Raspberry no tiene entradas análogas. Por el lado de procesamiento y almacenamiento de datos esta unidad cuenta con 32 Mbytes de memoria Flash donde se tiene la suficiente capacidad de almacenamiento en memoria no volátil de la información recopilada por la estación meteorológica. Aunque para este proyecto la información almacenada se lee localmente, para una línea de trabajo futuro sería de gran utilidad poder transmitir remotamente la información y esta unidad tiene un modem GSM.

La unidad Owa33 de Owasys es una plataforma robusta de hardware, especialmente diseñada para aplicaciones m2m (machine to machine), la cual cuenta con un sistema operativo Linux que permite un ambiente de desarrollo libre y que cuenta con gran capacidad de memoria (32 MB de memoria RAM y 32 MB de memoria Flash) para poder almacenar una base de datos de todos los registros capturados de la estación meteorológica en el lapso del tiempo del estudio. Adicionalmente esta plataforma cuenta con entradas ADC que permiten la conversión de las señales de los sensores análogos a un valor digital para ser registrados y procesados. También cuenta con entradas digitales, las cuales permiten registrar el estado lógico de un sensor o llevar un conteo de eventos que genera el mismo.



Figura 10 Plataforma de Hardware Estación Meteorológica (Owasys, 2011)

Especificaciones tomadas de (Owasys, 2011). Esta unidad posee tres puertos seriales RS232, 2 puertos USB y un puerto RS485, lo cual la hace una plataforma versátil para la adecuación de múltiples sensores con diferentes tipos de interfaces de comunicación. Con respecto a la capacidad de procesamiento, esta unidad tiene una CPU de 32 bits en base a un procesador ARM9 corriendo a 400 MHz, viene con una memoria RAM de 32 MBytes, una memoria FLASH de 32 MBytes y con un sistema operativo Linux OS: Kernel 2.6.36. Adicionalmente cuenta con las siguientes especificaciones:

- Rango de temperatura: -30°C a +80°C
- Voltaje de entrada: 7V to 48V
- Consumo de corriente: 50 mA
- GSM: GSM850 + EGSM900 + GSM1800 + GSM1900
- Peso: 270g
- Dimensiones: 110 x 85 x 40 mm

Micro-Fit 24 pin	Pin	Function	Pin	Function
	12	GND	24	Vin
	11	ON/OFF	23	V_OUT (4V5)
	10	TXD-0	22	RXD-0
	9	TXD-3 / RTS-0	21	RXD-3 / CTS-0
	8	TXD-1 / DCD-0	20	RXD-1 / DTR-0
	7	RS485A	19	RS485B
	6	DIO-0 / AIN0	18	DIO-1 / AIN1
	5	DIO-2 / AIN2	17	DIO-3 / AIN3
	4	DIO-4	16	DIO-5 (K line 2)
	3	DIO-6 (iButton)	15	DIO-7 (K line 1)
	2	DIO-8 (high side)	14	DIO-9 (high side)
	1	CANL1	13	CANH1

Figura 11 Conector Unidad (Owasys, 2011)

Los recursos de la plataforma Owa 33 se acceden a través de un conector Micro-fit de 24 pines, donde se encuentran por ejemplo las terminales de alimentación ,12 GND (tierra) y 24 VIN (Voltaje de entrada), así como las entradas análogas, las entradas digitales y los puertos seriales entre otros.

2.1.2 Pluviómetro

Para la medición de la cantidad de lluvia caída, se seleccionó el pluviómetro *Rain Collector 7852* de Davis. Especificaciones tomadas de (Davis, 2013).

			
Nombre	Davis 7852	RAINEW 111	Young 52202
Tipo	Tipping bucket	Tipping bucket	Tipping bucket
Salida	Pulsos	Pulsos	Pulsos
Fuente	No necesita	6 a 24 V	24 V
Resolución	0.01" (0.2 mm)	0.01 inches	0.1 mm
Precisión	2%	2%	2%

Tabla 3 Comparativo Pluviómetro

El pluviómetro de Davis 7852 ha sido seleccionado entre tres modelos, donde se compara con el modelo RAINW111 y el Young 52202. Las especificaciones de los tres modelos son muy similares, sin embargo, el pluviómetro Davis 7852 no necesita alimentación externa, lo que simplifica su conexión y acoplamiento a la estación meteorológica. Adicionalmente también se selecciona debido a la confiabilidad de los instrumentos Davis en el campo de la meteorología, debido a su homologación en agencias como la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).



Figura 12 Pluviómetro (Davis, 2013)

Este pluviómetro recolecta la lluvia caída a través de un cono interno que pasa el agua hasta una cámara interna donde por cada 0,2 mm de agua genera un pulso de salida. Este pulso cambia el estado de la salida entre tierra y circuito abierto, funcionando similar a un interruptor normalmente abierto. Su funcionamiento es netamente mecánico, por lo tanto, no necesita una fuente de alimentación. Como se ve en la figura, el principio de este pluviómetro consiste en la inversión de una báscula que se produce generalmente a 0,2 mm de precipitación, así que cada vez que caen 0,2 mm de lluvia la báscula oscila, vaciando la cubeta llena, mientras comienza a llenarse la otra.

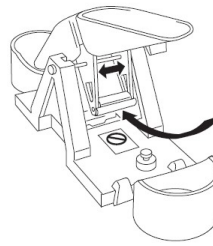


Figura 13 Mecanismo de un pluviómetro (Davis, 2013)

Esta salida es cableada hacia una entrada de la unidad Owa 33, donde se contarán los pulsos generados por el pluviómetro registrando así los milímetros de lluvia caída.

Este pluviómetro se conecta a través de un conector RJ11 que trae tres cables conectados, un cable negro que no se usa, un cable rojo el cual es el pin que conmuta, un cable rojo y un cable amarillo que se conectan como referencia a la tierra del sistema.

- Dimensiones 219 mm x 223 mm x 280 mm
- Peso 1.5 kg
- Resolución 0.2 mm

2.1.3 Anemómetro

Para la medición de la velocidad del viento se dispone de un anemómetro *WS603B de AAG*. Las especificaciones técnicas e imágenes fueron obtenidas del manual de integración de *Weather Instrument*.

			
Nombre	WS603B de AAG	Davis 7911	PCE-WL 1
Dirección	Digital RS485	Potenciómetro	No tiene
Fuente	12 V	No tiene	24 V
Salida	Digital RS485	Frecuencia	Frecuencia
Resolución	0.8 m/s	0.1 m/s	0.8 m/s
Precisión	±5%	±5%	± 0.5 m/s

Tabla 4 Comparativo anemómetro

El anemómetro WS603B de AAG ha sido elegido entre tres modelos de sensores de velocidad del viento, donde se compara con los modelos Davis 7911 y PCE-WL1 de PCE. Las especificaciones de los tres modelos son similares, sin embargo, el anemómetro de AAG entrega la información tanto de velocidad del viento como de dirección digitalmente a través de un puerto serial RS485, mientras que en los otros dos modelos se debe implementar un frecuencímetro debido a que la salida es en función de pulsos por minuto. Adicionalmente el modelo de AAG entrega la información de velocidad del viento directamente, mientras que

el modelo de Davis lo hace a través de un potenciómetro donde se tendría que implementar un ADC y el modelo de PCE no entrega el dato de dirección del viento.



Figura 14 Anemómetro

La información tanto de velocidad como de dirección del viento es entregada directamente a través de un puerto RS485, en formato hexadecimal de 20 bytes que empieza con el byte 0 (2B) y termina con el byte 19 (91):

2B 77 73 0F 01 EA A2 0B 00 00 2C 00 C0 01 FF 8D 81 FF 00 91

Los bytes 2B 77 73 ("+ws") corresponden al encabezado de la trama, el byte 3 (0x0F, 15d) a la longitud del *payload* de la trama, el byte 7 (0x0B, 11d) corresponde a la dirección del viento y el byte 8 corresponde a la velocidad del viento. La dirección del viento se decodifica de acuerdo al contenido del byte 7 a los siguientes valores:

0=NULL, 1=N, 2=NNE, 3=NE, 4=NEE, 5=E, 6=EES, 7=ES, 8=ESS, 9=S, 10=SSW, 11=SW, 12=SWW, 13=W, 14=WWN, 15=WN, 16=WNN.

La velocidad del viento viene dada en nudos por lo tanto el valor del byte 8 se multiplica por 0.514444 para pasarlo a metros por segundo.

Este anemómetro trae tres aspas, las cuales internamente por efecto hall detecta la velocidad del viento a través de un contador de pulsos. Similarmente tiene una veleta que también por efecto hall permite detectar la dirección del viento. Adicionalmente viene equipado con un sensor interno de temperatura y un sensor de luminosidad. Tiene un procesador que convierte las señales del sensor de efecto hall que convierte los pulsos generados por las aspas a velocidad del viento en nudos y las transmite a través de un puerto RS485.

- Dimensiones 470 mm x 191 mm x 121 mm
- Peso 1.332 kg
- Rango de velocidad 1 a 322 km/h
- Rango de dirección 0° a 360°
- Precisión velocidad del viento $\pm 5\%$
- Precisión de dirección del viento $\pm 7^\circ$
- Resolución de velocidad del viento 0.8 m/s.
- Voltaje de alimentación 12V

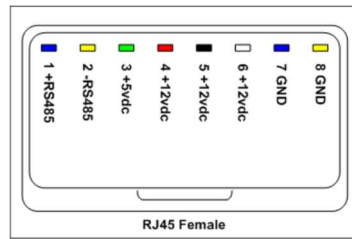


Figura 15 Conector Anemómetro

A través de un puerto RJ45 se energiza el anemómetro y se hace la comunicación a través de un puerto RS485.

2.1.4 Sensor de Radiación Solar

Para la medición de la radiación solar se ha seleccionado el sensor 6425 de Davis. Las especificaciones técnicas e imágenes fueron tomadas del manual de integración (Davis, Solar Radiation Sensor 6450, 2010).

			
Nombre	Davis 6450	SR30 Hukseflux	CMP3 Kipp & Zonen
Respuesta espectral	400 a 1100 nanómetros	285 to 3000 nanómetros	300 a 2800 nanómetros
Fuente	3 V	12 V	No necesita
Salida	Análoga 0 a 3V	Modbus	Análoga 0 a 20 mV
Resolución	1.67 mV por W/m2	1 W/m2	5 to 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Precisión	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$

Tabla 5 Comparación sensor de Irradiancia

El sensor de radiación solar 6425 de Davis ha sido seleccionado entre otros dos modelos, el SR30 de Hukseflux y el CMP3 de Kipp & Zonen. Las especificaciones de los tres modelos son similares, sin embargo, el 6425 se acopla mejor a la plataforma meteorológica, ya que su salida análoga de 0 a 3V se acopla con una buena resolución a los canales ADC, mientras que por ejemplo la salida del modelo CMP3 es muy baja, apenas de 20mV en full escala, y la salida del modelo SR30 es del tipo Modbus, donde se tendría que implementar este protocolo en la estación adicionalmente que por este tipo de interfaz lo hace un instrumento de costo superior.



Figura 16 Sensor de radiación solar

Este sensor de radiación solar o piranómetro también ha sido seleccionado debido a la confiabilidad de los instrumentos de meteorología Davis, el cual mide la radiación global, la suma en el punto de medición de los componentes directo y difuso de la radiación solar. El transductor del sensor que convierte la radiación incidente a corriente eléctrica, es un fotodiodo de silicio con amplia respuesta espectral. La salida del sensor está dada en una señal de voltaje que es proporcional a la irradiancia. El transductor es un fotodiodo de silicio herméticamente sellado que incluye un amplificador que convierte la corriente del transductor en un voltaje de 0 a 2,5 Voltios. Cada sensor es calibrado por un patrón secundario estándar el cual es calibrado periódicamente contra un piranómetro espectral de precisión en luz natural del día según trazabilidad del fabricante Davis Instruments (Davis, Solar Radiation Sensor 6450, 2010). La salida analógica es de 1,67 mV por cada W/m², de manera que esta conversión deber ser hecha en la plataforma a través de un canal ADC. A continuación, se presentan las especificaciones del sensor:

- Temperatura de Operación: -40° a +65° C
- Temperatura de almacenamiento: -45° to +70°C
- Respuesta Espectral 400 a 1100 nanómetros
- Porcentaje de Lectura $\pm 3\%$ (0° a $\pm 70^\circ$ ángulo incidente)
- Porcentaje de Escala completa $\pm 2\%$ (0° a $\pm 90^\circ$)
- Tipo de Cable 4-conductores, 26 AWG
- Conector Modular RJ-11
- Cable verde. Salida (0 a +3VDC); 1.67 mV por W/m²
- Cables rojo y negro a tierra
- Cable Amarillo +3 VDC $\pm 10\%$; 1mA (típico)
- Coeficiente de temperatura + 0.12% per °C
- Temperatura de referencia 25°C
- Corrección por grado sobre referencia -0.12% por °C
- Corrección por grado bajo referencia +0.12% per °C
- Materia de carcasa UV-resistente PVC plástico
- Dimensiones 51 mm x 70 mm x 57 mm
- Peso 226 g
- Resolución y Unidades 1 W/m²
- Rango 0 a 1800 W/m²

- Precisión $\pm 5\%$ de la escala completa (Referencia: Eppley PSP en 1000 W/m²)
- Intervalo de actualización 50 segundos a 1 minute

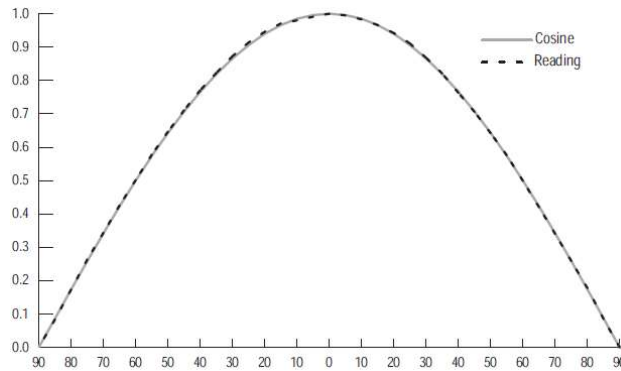


Figura 17 Respuesta coseno sensor de radiación solar

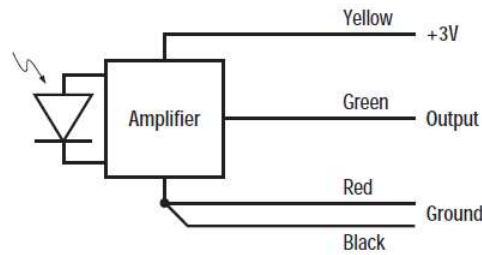


Figura 18 Diagrama de conexión sensor de radiación solar

A través de la salida Output del sensor se tiene una señal analógica (0 a +3VDC), con una relación de 1.67 mV por W/m². Esta señal se conecta a un conversor ADC para obtener su correspondiente valor de Irradiancia.

2.1.5 Sensor de Humedad relativa y temperatura

Para la medición de la humedad relativa y de la temperatura se seleccionó el sensor AM2302. Las especificaciones técnicas e imágenes han sido descargadas de la página web del fabricante <https://www.adafruit.com/product/393>.



Figura 19 Sensor de humedad relativa y humedad

El sensor AM2302 incluye componentes de un sensor de humedad capacitivo y un sensor de temperatura de alta precisión conectados a un microcontrolador de alto desempeño. Cada sensor es calibrado en una cámara de calibración donde cada coeficiente de calibración es almacenado en el microcontrolador. Viene en un pequeño empaque, con bajo consumo de corriente y una distancia de transmisión hasta de 20 metros. Su interfaz de comunicación es digital de un solo cable *one-wire* donde se debe implementar el protocolo 1bb (one bit bus) para leer la información del sensor.

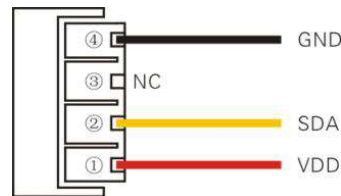


Figura 20 Conector sensor de humedad

El AM2302 se alimenta a través del Pin VDD con un voltaje de alimentación de 3.3V - 5.5V, sin embargo, es recomendado conectarlo a 5V. La comunicación con el sensor se hace a través del pin SDA (Serial Data), en el cual se ejecutan tanto las acciones de lectura como de escritura según el protocolo *one bit bus*.

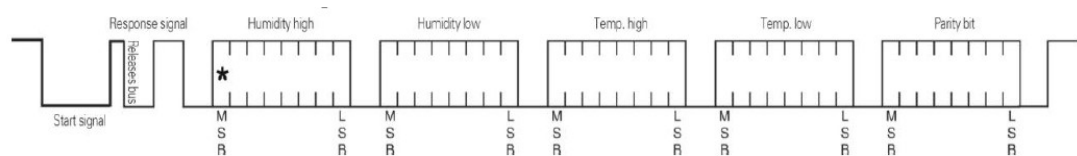


Figura 21 Protocolo 1bb

En la Figura 21 se muestra la manera en que el sensor transmite la información de medida del sensor a través del protocolo 1bb donde la humedad se transmite a través de 2 bytes con una resolución de 16 bits. Adicionalmente también se transmite el valor de la temperatura a 16 bits y un byte de paridad para confirmar la integridad de la información recibida.

Ejemplo : 40 bits recibidos :

0000 0010 1001 0010 0000 0001 0000 1101 1010 0010
 Parte alta hum Parte baja hum parte alta temp Parte baja temp Paridad

Calcular:

0000 0010+1001 0010 +0000 0001+0000 1101= 1010 0010 (Paridad)

De acuerdo al byte de paridad el dato recibido es correcto :

humedad : 0000 0010 1001 0010 = 0292H (Hexadecimal) = 658 (decimal)

=> Humedad = 65.8%RH

Temperatura. : 0000 0001 0000 1101 = 10DH (Hexadecimal) = 269 (decimal)

=> Temperatura= 26.9

Especificaciones Sensor de Humedad:

- Resolución: 0.1%RH
- Rango: 0 a 99.9 %RH
- Precisión en 25°C: ± 2 %RH
- Repetitividad: ± 0.3 %RH

Especificaciones Sensor de Temperatura

- Resolución: 0.1 °C 16 bits
- Precisión: ± 0.5 °C
- Rango: -40 a 80 °C
- Repetitividad: ± 0.2 °C

Especificaciones Eléctricas

- Voltaje de entrada: 3.3V - 5.5V
- Consumo de corriente: 500 uA
- Periodo de muestreo: 2s

2.2 Interfaz de Medición de Potencia

Plataforma			
Nombre	Arduino YUN	Raspberry pi 2	TWR-MCF51CNKIT
Procesador	AtherosAR9331 400MHz	ARM7 CPU 32bit 900MHz	MCF51CN128 50 MHz
Memoria RAM	64 MByte	1 GByte	24 K
Memoria FLASH	16 MByte	No (SD Card)	128 K
Puertos RS232	1 (TTL)	1(TTL)	2(TTL)
Puerto I2C	1	1	1
Entradas Digitales	6	22	16
Entradas Análogas	6	0	12

Tabla 6 Comparación Interfaz medición de potencia

Para registrar la potencia de salida de los paneles solares es necesario medir el voltaje y la corriente de cada uno, tanto del panel monocristalino como del panel policristalino. Para esto se seleccionó la plataforma Arduino Yun entre dos plataformas más de desarrollo, la Raspberry pi 2 y la TWR-MCF51CNKIT. Se seleccionó el Arduino Yun debido a que es una plataforma de adquisición de datos en la se puede integrar fácilmente sensores de tipo digital y análogo, ya que cuenta con puertos de datos seriales como I2C y a la vez canales de conversión análoga. Por otro lado, por ejemplo, la plataforma Raspberry pi 2 es también una plataforma de desarrollo muy versátil pero no cuenta con canales de conversión análoga y por el lado de la plataforma TWR-MCF51CNKIT si cuenta con los canales ADC pero cuenta con menos recursos en memoria.



Figura 22 Plataforma medición de potencia

El Arduino Yun es una plataforma de open hardware basada en el procesador ATmega32u4. El procesador soporta una distribución Linux basado en OpenWrt llamado OpenWrt-Yun. La plataforma soporta Ethernet y WiFi, cuenta con un puerto USB-A, 20 entradas/salidas digitales (de los cuales 7 pueden ser usados como salidas PWM y 12 como entradas análogas), un cristal de 16 MHz y 3 botones de reinicio.

A través de los pines digitales del Arduino se pueden implementar puertos de comunicación seriales, debido a esta capacidad es ideal para la implementación de la interfaz de medición de potencia, ya que los sensores de corriente y voltaje seleccionados funcionan con un puerto I2C que se puede implementar fácilmente en esta plataforma. Adicionalmente también se puede implementar un puerto digital 1bb (one bit bus), que permite la comunicación directa con el sensor de humedad y temperatura, así como también se puede implementar un puerto serial RS232 para comunicarse con la plataforma de la estación meteorológica para transmitirle la información de potencia generada por los paneles y las variables de humedad y temperatura.

Especificaciones

- Microcontrolador: ATmega32U4
- Voltaje de operación: 5V
- Entrada de Voltaje: 5
- Puertos Digitales I/O: 20
- Canales PWM: 7
- Entradas Análogas: 12
- Corriente DC por I/O: 40 mA
- Corriente DC para pines de 3.3V: 50 mA
- Memoria Flash: 32 KB
- SRAM: 2.5 KB
- EEPROM: 1 KB
- Velocidad del reloj: 16 MHz

La plataforma Arduino Yun cuenta con un Microprocesador Linux que permite un desarrollo fácil y robusto, presentando los siguientes recursos:

- Procesador Atheros AR9331
- Arquitectura MIPS @400MHz
- Voltaje de operación 3.3V
- Ethernet IEEE 802.3 10/100Mbit/s
- WiFi IEEE 802.11b/g/n
- USB Tipo-A 2.0 Host
- Micro-SD
- RAM 64 MB DDR2
- Flash 16 MB
- SRAM 2.5 KB
- EEPROM 1 KB
- Velocidad del reloj 16 MHz

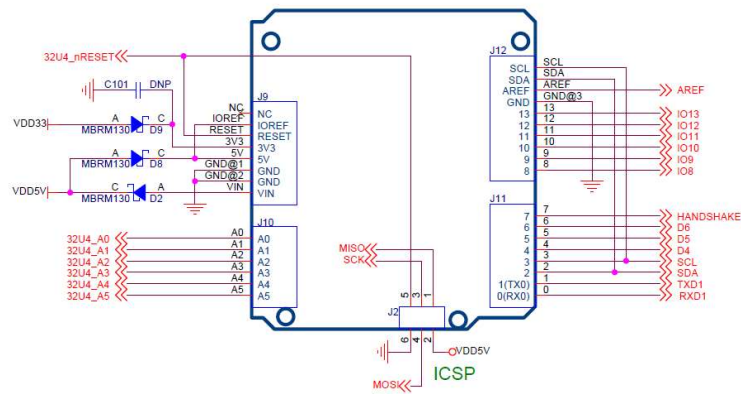


Figura 23 Esquema de conexión Arduino Yun

2.2.1 Sensores de Medición de Potencia

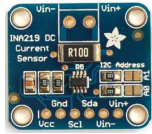
			
Nombre	Adafruit INA219	ACS758LCB-100B	POLOLU-2199
Corriente	Si	Si	Si
Voltaje	Si	No	No
Salida	I2C	Análoga	Análoga
Resolución	0,8 mA	40 mV / A	95 mV / A
Precisión	±1%	±5%	±3%

Tabla 7 Comparación sensor de potencia

Para medir la corriente y el voltaje a la salida de los paneles solares (medidos en los terminales positivo y negativo de cada panel) se selecciona el dispositivo Adafruit INA219. Estos sensores fueron seleccionados debido a su capacidad de procesamiento y simplicidad, debido a que a través de un solo puerto serial I2C entrega la información de la medición tanto

de corriente como de voltaje, mientras que la mayoría de sensores como el ACS758LCB-100B y el POLOLU-2199 solo miden corriente en magnitudes grandes.

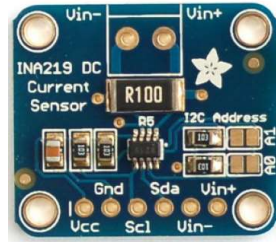


Figura 24 Sensor de corriente

A través de este dispositivo se pueden medir tanto la corriente como el voltaje de la carga sin necesidad de implementar dos sensores, además que solo se necesita de un puerto I2C para obtener las variables medidas con una precisión del 1%, mientras que con otros sensores es necesario emplear un canal ADC por cada variable. Para el caso de la medición de la interfaz de potencia con solo dos dispositivos INA219 se puede tener la potencia de los dos paneles y solo utilizando un puerto I2C.

El INA219 mide la corriente de la carga a través de un resistor shunt, además que puede manejar cargas con voltaje hasta de 26 voltios, siendo ideal para mediciones de carga de batería en paneles solares. Un amplificador de precisión mide el voltaje a través de una resistencia de 0.1ohm al 1%. Ya que la máxima diferencia de entrada del amplificador es de $\pm 320\text{mV}$, este sensor puede medir hasta ± 3.2 Amperios. Con un conversor ADC de 12 bits, la resolución en $\pm 3.2\text{A}$ es de 0.8mA.

Si más de un sensor INA219 es usado, cada dispositivo debe tener asignada una única dirección. Esto es hecho con unos *jumpers* de dirección que vienen en el dispositivo. La dirección base del I2C es 0x40. La dirección binaria que se programa con los *jumpers* es sumada la dirección base I2C.

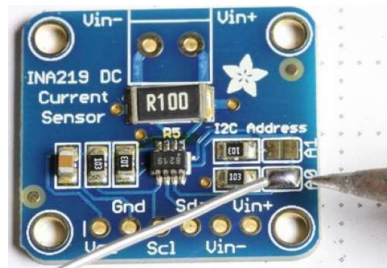


Figura 25 direccionamiento sensores de corriente

Especificaciones

- Voltaje de entrada: 6V max
- Diferencia de voltaje V_{in+} y V_{in-} : 26V
- Entrada de corriente en cualquier pin: 5 mA

- Salida de corriente digital open drain: 10 mA
- Temperatura de operación: -40 a 150 °C
- Resolución ADC: 12 bits
- Error de medición de corriente: $\pm 0.2\%$

2.3 Paneles Solares

Como se determinó a partir del estado del arte, las tecnologías más usadas en la generación de energía solar fotovoltaica son la monocristalina y la policristalina. Para este proyecto se han elegido dos paneles de características similares para tener el mismo marco de referencia para determinar el impacto de las condiciones ambientales en las dos tecnologías, siendo la potencia de salida elegida de 50 vatios, tanto para el panel de tecnología monocristalina como el de tecnología policristalina. Se eligieron los paneles RNG-50D (tecnología monocristalina) y RNG-50P (tecnología policristalina) del fabricante Renogy debido a que este fabricante cumple con todas las certificaciones y especificaciones para hacer un estudio confiable a partir de la potencia generada de los paneles. Tanto las imágenes como especificaciones técnicas de los paneles han sido descargadas de la página web del fabricante www.renogy-store.com.

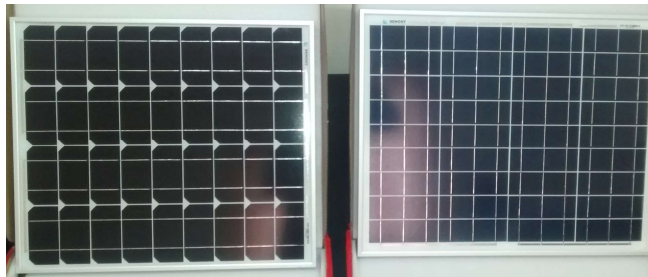


Figura 26 Paneles solares monocristalino (izquierda) y policristalino (derecha)

2.3.1 Panel Monocristalino RNG-50D



Figura 27 Panel solar monocristalino

El panel solar de tecnología monocristalina RNG-50D del fabricante Renogy, es un panel de 50 vatios de salida, con un voltaje de 12 voltios y con una eficiencia de 14.67%, siendo superior a la del panel policristalino de la misma potencia de salida. Por esta misma condición de mayor eficiencia, estos paneles suelen ser más costosos que los paneles policristalinos de

la misma potencia. Todas las especificaciones de este panel son determinadas bajo las condiciones de pruebas estándar (Standard Test Conditions) con una Irradiancia de 1000W/m², una Temperatura de 25 C, y una masa de aire de 1.5.

Especificaciones Eléctricas

- Máxima Potencia: 50 W
- Optimo voltaje de operación (Vmp): 18.5 V
- Optima corriente de Operación (Imp): 2.70A
- Voltaje de circuito abierto (Voc): 22.7 V
- Corriente de cortocircuito (Isc): 2.84 A
- Máximo voltaje del sistema: 600 VDC UL
- Eficiencia del panel: 14.67%

Características Térmicas

- Temperatura de operación del panel: -40°C a +90°C
- Temperatura de operación nominal de la celda (NOCT): 47±2°C
- Coeficiente de temperatura de Pmax: -0.23%/°C
- Coeficiente de Temperatura de Voc: -0.33%/°C
- Coeficiente de Temperatura de Isc: 0.05%/°C

Características mecánicas

- Tipo de celda solar: Monocristalina (4.9 x 2.5 in)
- Número de celdas: 36 (4 x 9)
- Dimensiones: 630 x 541 x 30 mm
- Peso: 4.5 kg

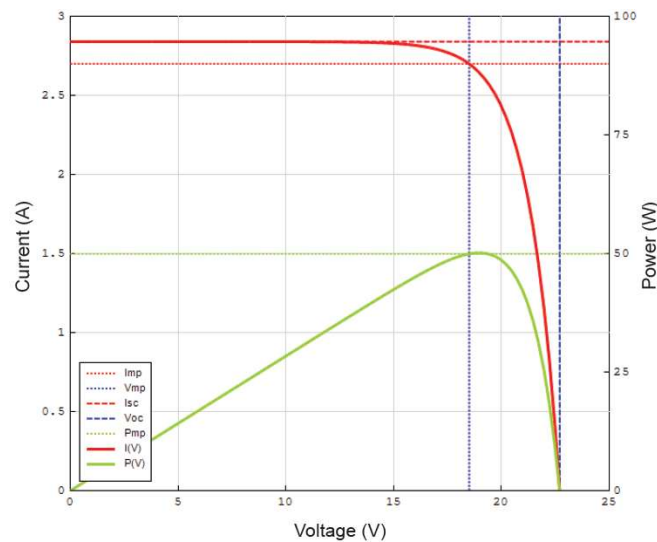


Figura 28 Características del panel monocristalino Vs Voltaje

2.3.2 Panel Policristalino RNG-50P



Figura 29 Panel solar Policristalino

El panel solar de tecnología policristalina RNG-50P del fabricante Renogy, es un panel de 50 vatios de salida, con un voltaje de 12 voltios y con una eficiencia de 13.37%, siendo inferior a la del panel monocristalino de la misma potencia de salida. Por esta misma condición de menor eficiencia, estos paneles suelen ser menos costosos que los paneles policristalinos de la misma potencia. Todas las especificaciones de este panel son determinadas bajo las condiciones de pruebas estándar (Standard Test Conditions) con una Irradiancia de 1000W/m², una Temperatura de 25 C, y una masa de aire de 1.5.

Especificaciones Eléctricas

- Máxima Potencia: 50 W
- Optimo voltaje de operación (V_{mp}): 17.8 V
- Optima corriente de Operación (I_{mp}): 2.80A
- Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): 22.4 V
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): 2.95 A
- Máximo voltaje del sistema: 600 VDC UL
- Eficiencia del panel: 13.37%

Características Térmicas

- Temperatura de operación del panel: -40°C a +80°C
- Temperatura de operación nominal de la celda (NOCT): 47±2°C
- Coeficiente de temperatura de P_{max}: -0.44%/°C
- Coeficiente de Temperatura de V_{oc}: -0.30%/°C
- Coeficiente de Temperatura de I_{sc}: 0.04%/°C

Características mecánicas

- Tipo de celda solar: Policristalina (6.10 x 2.05 in)
- Número de celdas: 36 (4 x 9)
- Dimensiones: 550 x 680 x 30 mm
- Peso: 5 kg

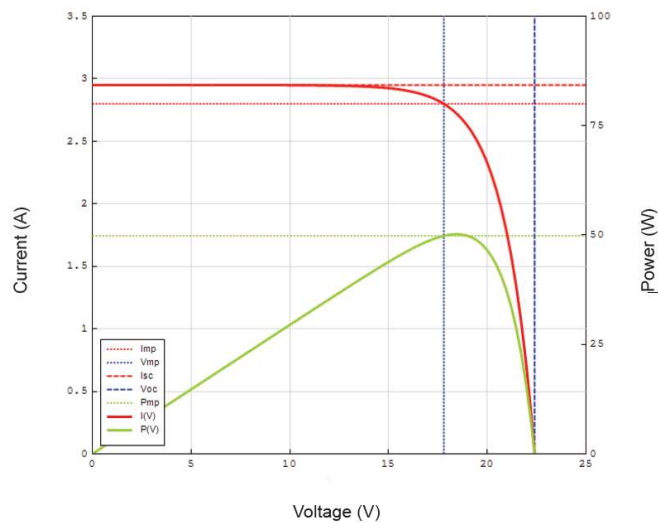


Figura 30 Características del panel policristalino Vs Voltaje

2.3.3 Regulador Panel solar

Debido a que el panel solar no puede manejar directamente una carga de potencia, se debe acondicionar un regulador de carga al panel, el cual a su vez comprende también una batería de respaldo. Las imágenes y especificaciones han sido descargadas de la página web del distribuidor del cargador <http://www.jiefeiyeinternational.com/jfy-sc0624n-series-solar-charge-controller.htm>.



Figura 31 Regulador de panel solar

Para este proyecto se seleccionó el cargador SC0624N de 12 Voltios y 6 Amperios. Este regulador ha sido seleccionado debido a que es del tipo PWM y cuenta con protecciones de sobre carga, sobre descarga, protección de polaridad inversa, protección de corriente inversa y corto circuito. En contraste con un regulador de tipo de circuito de diodos de carga reducida, en un regulador tipo PWM la eficiencia de carga es hasta un 16% más alta. Cuenta con un control digital donde se almacena en memoria flash los modos de control de trabajo.

Especificaciones

- Material: Plástico
- Corriente de carga: 6A
- Voltaje de trabajo: 12V
- Corriente de autoconsumo: < 6 mA.
- Caída de voltaje circuito de carga: < 0.26V
- Protección de sobre Voltaje (V): 17V
- Temperatura de trabajo: -5 a 50 °C
- Voltaje de arranque de carga: 14.6 V (únicamente cuando viene de sobre descarga)
- Voltaje de carga directo: 14.4 V
- Voltaje de carga flotante: 13.6 V
- Voltaje de retorno de carga: 13.2 V
- Voltaje de sobre descarga (V): 11.1
- Voltaje de retorno de sobre descarga (V): 12.6V
- Temperatura de Compensación: -5mv/°C/Celda
- Dimensiones: 13.8 * 9 * 2.4cm
- Peso: 220g



Figura 32 Funciones regulador panel solar

Este regulador cuenta con varios modos de funcionamiento para la carga de la batería, para seleccionar el modo deseado se hace uso del botón que viene al lado del indicador “work Mode” que se ve en la figura superior. Para esta aplicación se deja en el modo de cargador Universal. Así mismo se cuenta con 3 indicadores luminosos (Sun, Bat y Load) que indican el estado del panel, el estado de la batería y el estado de la carga, que para el caso de este proyecto es una carga luminosa tipo led de 10 W a 12V. Para la conexión del panel, de la batería y de la carga, cuenta con una bornera debidamente indicada.

2.3.4 Batería sistema de carga

La batería seleccionada para el sistema de prueba de los paneles solares fue la referencia FL1275 debido a que cuenta con una salida de voltaje de 12V y una capacidad de corriente de 7.5Ah/20hr lo cual está de acuerdo a las especificaciones de potencia de los paneles (50W @ 12V).



Figura 33 Batería sistema de carga

Estas baterías de ácido plomo de válvula regulada son diseñadas con tecnología AGM (Absorbent Glass Mat), platos de alto desempeño y electrolitos para ganar extra potencia de salida para aplicaciones de sistemas ampliamente usados en campos como UPS, sistemas de iluminación de emergencia. Estas baterías son selladas y libre de mantenimiento con un diseño de construcción que evita cualquier tipo de vertido. Cuenta con gran desempeño de recuperación de descarga profunda, y con buenas características de baja auto descarga.

Especificaciones

- Capacidad en 25°C: 20hR (0.375A, 10.5V) 7.5Ah
- Dimensiones: 151±1mm 65±1mm 94±1mm
- Peso: 2.32 Kg
- Resistencia: Carga completa en 25°C Aproximadamente 24mOhms
- Auto descarga: 3% de capacidad declinada por mes a 25°C (promedio)
- Afectación de capacidad por temperatura: 40°C 102%, 25°C 100%, 0°C 85%, -15°C 65%
- Voltaje de carga (25°C): 14.5-14.9V(-30mV/°C), máxima Corriente: 2.25 A.

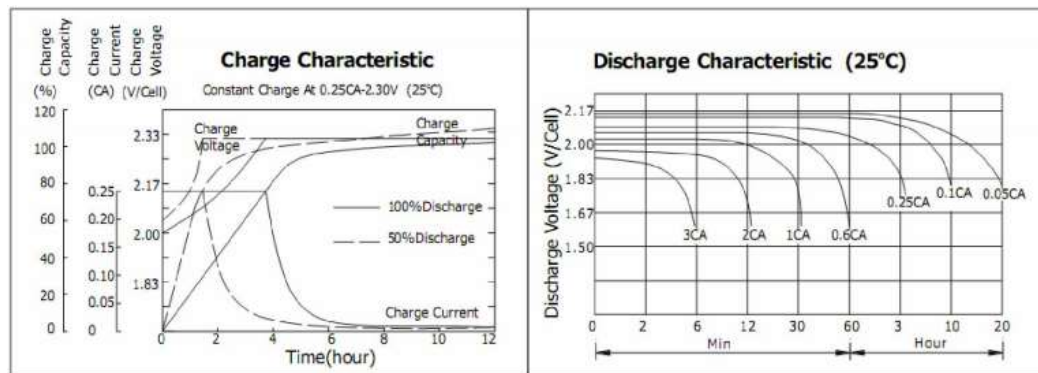


Figura 34 Curvas características de la batería

2.3.5 Carga

Para generar un consumo de corriente y por ende exigirles potencia a los paneles solares, se ha seleccionado una carga luminosa a la salida del sistema del cargador del panel solar. La carga seleccionada fue una lámpara tipo Led Bulbo de 10 vatios a 12 voltios tipo E27, debido a que esta carga se encuentra en el rango de potencia (50W) y salida de voltaje de los paneles. Las especificaciones e imágenes fueron descargadas de la página web del distribuidor de las lámparas www.solty.com.



Figura 35 Lámpara de carga

Especificaciones

- Voltaje: 12V
- Potencia: 10W
- Flujo luminoso: 800LM
- Color de temperatura: 5500-6400K Luz Blanca
- Dimensiones: 120x60 mm
- Tipo de cobertura: vidrio
- Led: Epistar SMD 20 PCS
- Base: E27
- Angulo de apertura: 180°
- Temperatura: -40°C a 50°C
- Tiempo de vida: 30.000 horas

2.4 Esquema de Conexiones Estación Meteorológica e Interfaz de Potencia

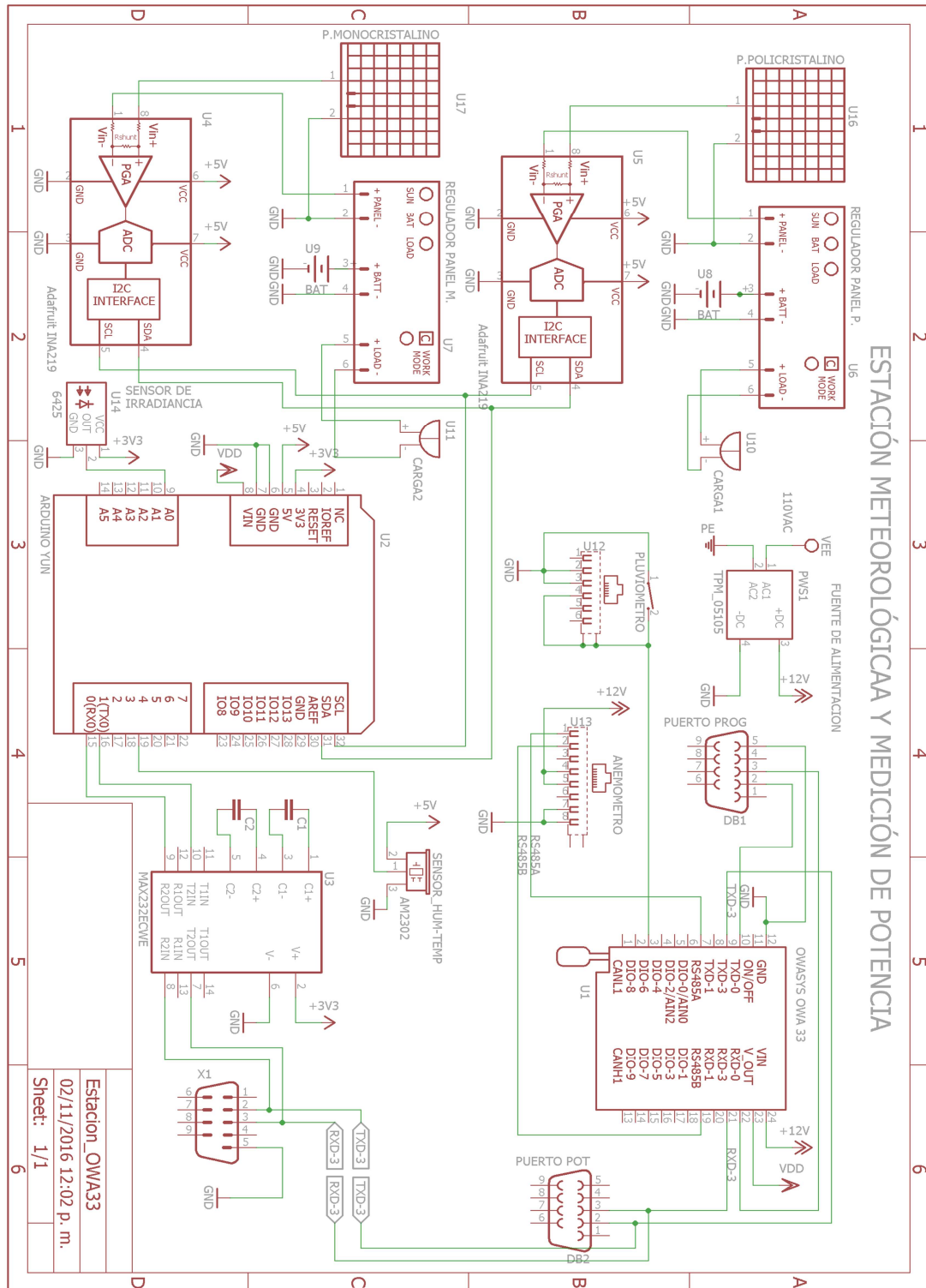


Figura 36 Esquema de Conexiones Estación Meteorológica e Interfaz de Potencia

3. Implementación y Validación

De acuerdo al diseño detallado y a los componentes seleccionados, se hace la implementación de la estación meteorológica y la puesta de los paneles solares, tanto monocristalino como policristalino, con la correspondiente interfaz para la medición de potencia de salida de cada uno. El sistema ha sido instalado en la ciudad de Bogotá en las coordenadas de latitud 4.6564778° y longitud 74.0612735° a una altitud de 2592 metros sobre el nivel del mar.

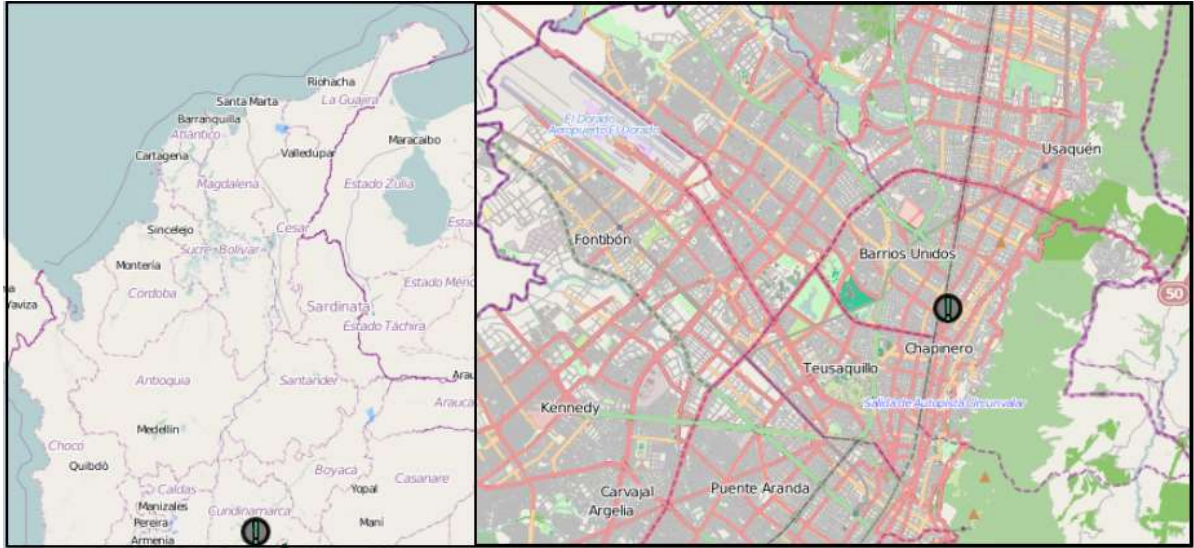


Figura 37 Ubicación Geográfica de la estación



Figura 38 Puesta de Paneles solares

Los paneles se instalan en un tejado con las mismas condiciones de inclinación e irradiancia, donde todos los factores climáticos como temperatura, humedad, viento y lluvia afectara a los paneles de las dos tecnologías, tanto monocristalina como policristalina, de igual manera.



Figura 39 Sensores Estación Meteorológica

La estación meteorológica se instala en las mismas condiciones de los paneles solares, a una distancia aproximada de 2 metros, debido a que a esta altura los sensores quedan en condiciones directas a las variables ambientales sin sombras u obstáculos.

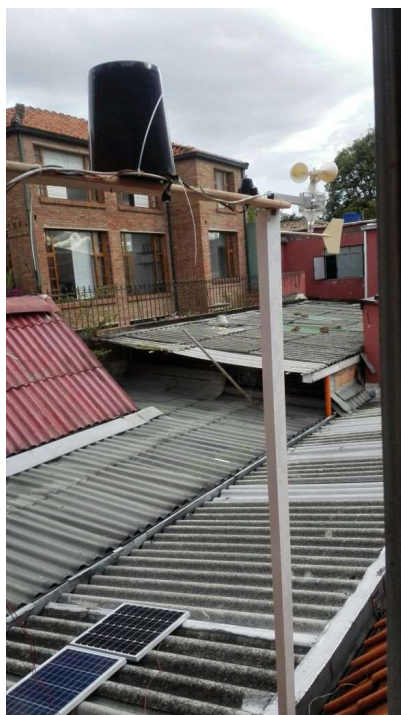


Figura 40 Estación Meteorológica y paneles

Los sensores de pluviometría, temperatura, humedad, irradiancia y velocidad del viento se instalan sobre un soporte paralelo a la ubicación de los paneles. La ubicación del soporte tiene una línea de vista directa al horizonte y no tiene sombras que afecten el registro de las variables climáticas. Tanto la plataforma de procesamiento de las variables climáticas como la plataforma de registro de potencia se instalan en un recinto cerrado.

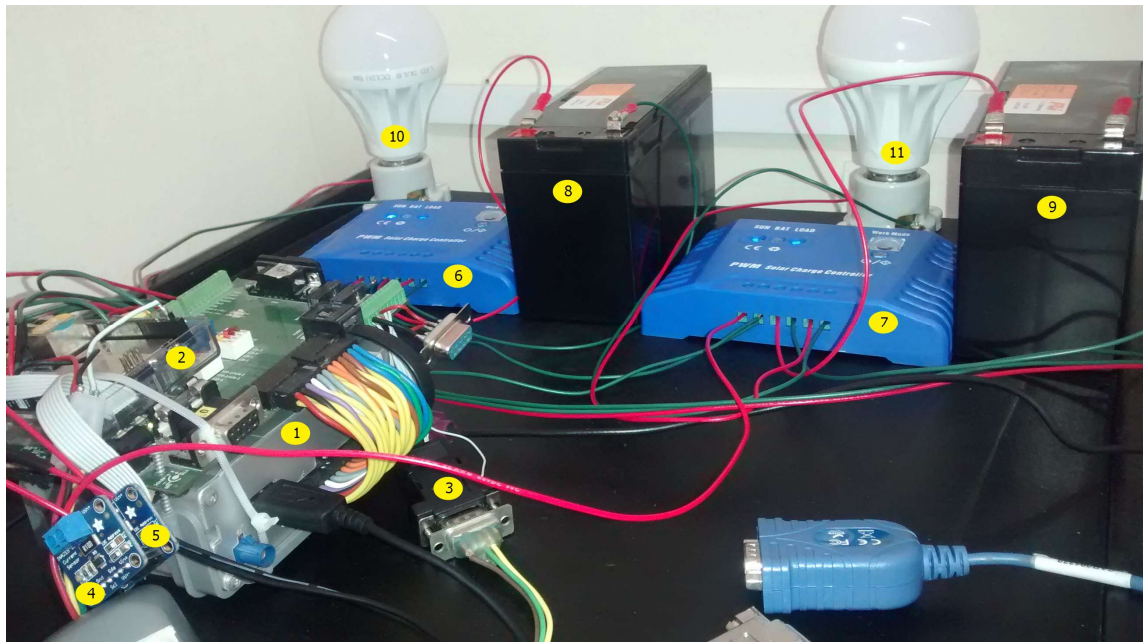


Figura 41 Conexiones plataforma de procesamiento

Los elementos referenciados en la figura superior se listan a continuación:

1. Unidad de procesamiento de variables climáticas Owasys Owa 33 (U1 esquemático)
2. Unidad de procesamiento de variables de potencia Arduino YUN (U2 esquemático)
3. Interfaz RS232 de comunicación (U3 esquemático)
4. Sensor de corriente y voltaje Adafruit INA219 (U4 esquemático)
5. Sensor de corriente y voltaje Adafruit INA219 (U5 esquemático)
6. Regulador panel SC0624N (U6 esquemático)
7. Regulador panel SC0624N (U7 esquemático)
8. Batería 12V 7A FL1275 (U8 esquemático)
9. Batería 12V 7A FL1275 (U9 esquemático)
10. Carga Led Bulbo de 10 vatios (U10 esquemático)
11. Carga Led Bulbo de 10 vatios (U11 esquemático)
12. Pluviómetro Davis 7852 (U12 esquemático)
13. Anemómetro WS603B de AAG (U13 esquemático)
14. Sensor de Irradiación solar 6425 de Davis (U14 esquemático).
15. Sensor de Humedad y Temperatura AM2302 (U15 esquemático)
16. Panel solar Policristalino RNG-50P (U16 esquemático)
17. Panel solar Monocristalino RNG-50D (U17 esquemático)



Figura 42 Ubicación sensores

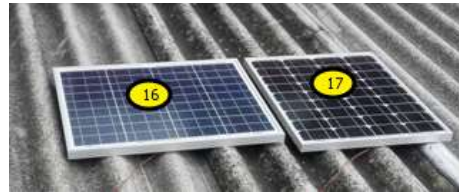


Figura 43 Ubicación paneles

3.1 Validación de Mediciones de Potencia

Para verificar que las mediciones de los sensores de corriente y voltaje (Adafruit INA219) en los paneles solares, tanto monocristalino como policristalino fueran correctas, se realizó una calibración con un multímetro modelo Fluke 115 como patrón secundario, cotejando las lecturas del multímetro, tanto en modo de voltímetro como de amperímetro, con los datos arrojados por la interfaz de medición de potencia.

3.1.1 Cálculo de error y linealidad del sensor de voltaje

Se realizan mediciones de voltaje con pasos de 0,5 voltios en una escala de 0 a 20 Voltios, comparando la medición del sensor con la del multímetro Fluke 115 obteniendo el error de cada lectura.

#	m (patron)	q (sensor)	error	#	m (patron)	q (sensor)	error	#	m (patron)	q (sensor)	error
1	0	0	0	15	7,01	7	0,01	29	14,07	14,08	0,01
2	0,48	0,48	0	16	7,52	7,51	0,01	30	14,5	14,49	0,01
3	1	1	0	17	8	8	0	31	15,03	15,04	0,01
4	1,5	1,49	0,01	18	8,5	8,49	0,01	32	15,49	15,5	0,01
5	2,08	2,07	0,01	19	9,08	9,07	0,01	33	16,09	16,08	0,01
6	2,48	2,48	0	20	9,49	9,49	0	34	16,57	16,58	0,01
7	3,01	3	0,01	21	10,06	10,05	0,01	35	17,06	17,06	0
8	3,54	3,55	0,01	22	10,5	10,5	0	36	17,51	17,51	0
9	4	3,99	0,01	23	11	10,99	0,01	37	18	18	0
10	4,53	4,53	0	24	11,5	11,51	0,01	38	18,52	18,51	0,01
11	5,04	5,05	0,01	25	12	12	0	39	19	19	0
12	5,52	5,52	0	26	12,51	12,5	0,01	40	19,53	19,52	0,01
13	6,02	6,03	0,01	27	13,07	13,07	0	41	20,01	20,01	0
14	6,51	6,5	0,01	28	13,52	13,51	0,01	42	20,5	20,49	0,01

Tabla 8 Datos calibración sensor de voltaje

m = medida del multímetro (instrumento patrón)

q = medida entregada por el sensor de voltaje

Se halla el error de linealidad obteniendo la recta de regresión de los datos.

$$q = am + b, \quad q = 1m - 0,003$$

$$a = \frac{n \sum m_i q_i - (\sum m_i)(\sum q_i)}{n \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2} = 1,00007$$

$$b = \frac{(\sum q_i)(\sum m_i^2) - (\sum m_i q_i)(\sum m_i)}{n \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2} = -0,003$$

$$R = \frac{n \sum m_i q_i - (\sum m_i)(\sum q_i)}{\sqrt{(n \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2)(n \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2)}} = 0,999$$

El coeficiente de correlación R indica que la aproximación es fiable ($0.8 < R < 1$).

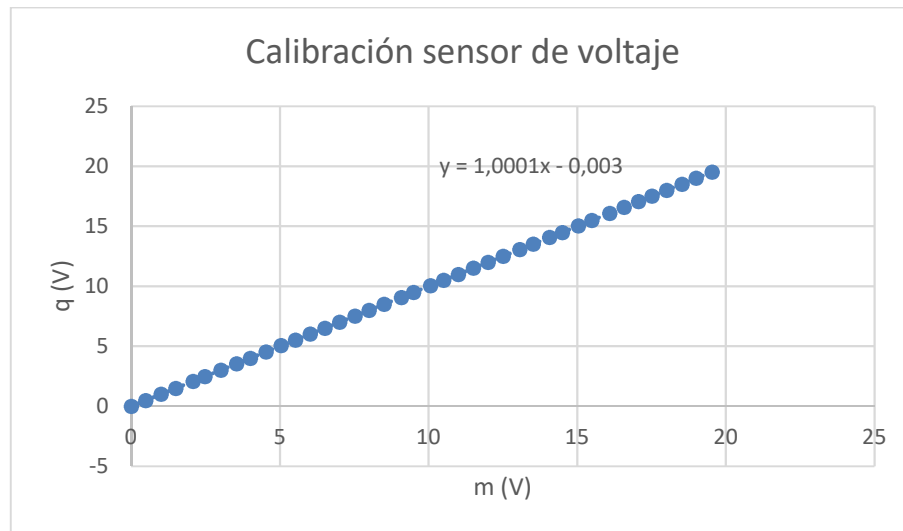


Figura 44 Grafica calibración sensor de voltaje

Se halla el error de linealidad:

$$\Delta_{linealidad} = \text{máximo} \left| m_i - \frac{q_i - b}{a} \right| = 8,49 \times 10^{-5}$$

Se halla el error medio absoluto (mae) a partir del vector del error resultante de cada lectura del sensor vs la lectura del patrón:

$$mae = 0.0063$$

Se halla el error medio cuadrático (mse) a partir del vector del error resultante de cada lectura del sensor vs la lectura del patrón:

$$mse = 6.25 \times 10^{-5}$$

Finalmente se obtiene el histograma del error resultante de la calibración del sensor de voltaje.

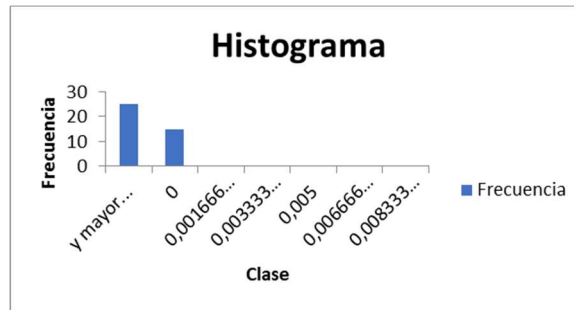


Figura 45 Histograma error sensor de voltaje

3.1.2 Cálculo de error y linealidad del sensor de corriente

Se realizan mediciones de corriente con pasos de 50 miliamperios en una escala de 0 a 2000 miliamperios, comparando la medición del sensor con la del multímetro Fluke 115.

#	m (patron)	q (sensor)	error	#	m (patron)	q (sensor)	error	#	m (patron)	q (sensor)	error
1	0	2	2	15	690	694	4	29	1397	1403	6
2	52	53	1	16	750	754	4	30	1449	1457	8
3	101	102	1	17	804	809	5	31	1495	1514	19
4	150	151	1	18	850	855	5	32	1551	1560	9
5	200	202	2	19	898	904	6	33	1600	1612	12
6	248	250	2	20	952	957	5	34	1657	1668	11
7	297	299	2	21	1007	1013	6	35	1701	1713	12
8	352	355	3	22	1053	1058	5	36	1759	1770	11
9	402	405	3	23	1102	1108	6	37	1804	1816	12
10	447	450	3	24	1154	1160	6	38	1856	1869	13
11	501	504	3	25	1202	1210	8	39	1905	1919	14
12	546	550	4	26	1253	1258	5	40	1958	1969	11
13	596	599	3	27	1299	1303	4	41	2008	2020	12
14	648	652	4	28	1349	1355	6	42	2059	2071	12

Tabla 9 Datos calibración sensor de corriente

m = medida del multímetro (instrumento patrón)

q = medida entregada por el sensor de corriente

Se halla el error de linealidad obteniendo la recta de regresión de los datos.

$$q = am + b, \quad q = 1,006m + 0,048$$

$$a = \frac{n \sum m_i q_i - (\sum m_i) (\sum q_i)}{n \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2} = 1,006$$

$$b = \frac{(\sum q_i)(\sum m_i^2) - (\sum m_i q_i)(\sum m_i)}{n \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2} = 0,048$$

$$R = \frac{n \sum m_i q_i - (\sum m_i) (\sum q_i)}{\sqrt{(n \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2) (n \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2)}} = 0,999$$

El coeficiente de correlación R indica que la aproximación es fiable ($0.8 < R < 1$).

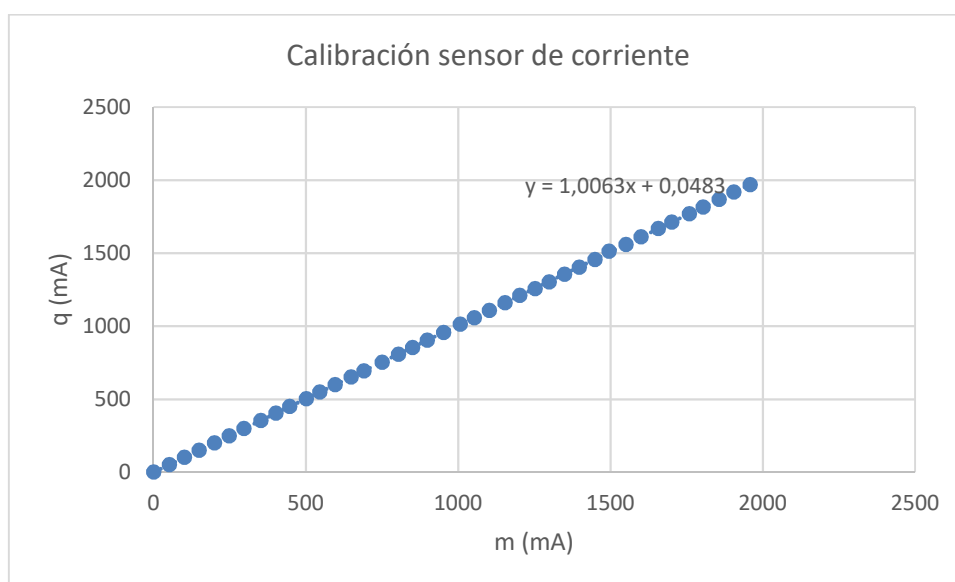


Figura 46 Grafica calibración sensor de corriente

Se halla el error de linealidad:

$$\Delta_{linealidad} = \text{máximo} \left| m_i - \frac{q_i - b}{a} \right| = 25,318$$

Se halla el error medio absoluto (*mae*) a partir del vector del error resultante de cada lectura del sensor vs la lectura del patrón:

$$mae = 6.1750$$

Se halla el error medio cuadrático (*mse*) a partir del vector del error resultante de cada lectura del sensor vs la lectura del patrón:

$$mse = 55.3750$$

Finalmente se obtiene el histograma del error resultante de la calibración del sensor de corriente.

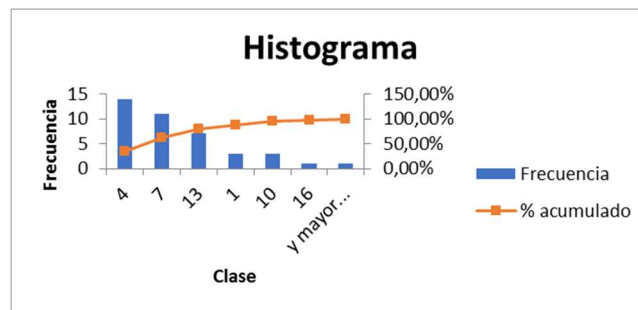


Figura 47 Histograma error sensor de corriente

3.1.3 Verificación medición de potencia en paneles solares

Una vez calibrado el sensor de voltaje y corriente se mide el voltaje de salida del panel solar monocristalino sin carga, donde medimos un voltaje de circuito abierto de 20.42 Voltios con el multímetro Fluke y se coteja con la lectura hecha por el sensor Adafruit INA219 que nos da una un valor de 20.41 Voltios, contando con un error de 0,01 Voltios en la lectura de voltaje.

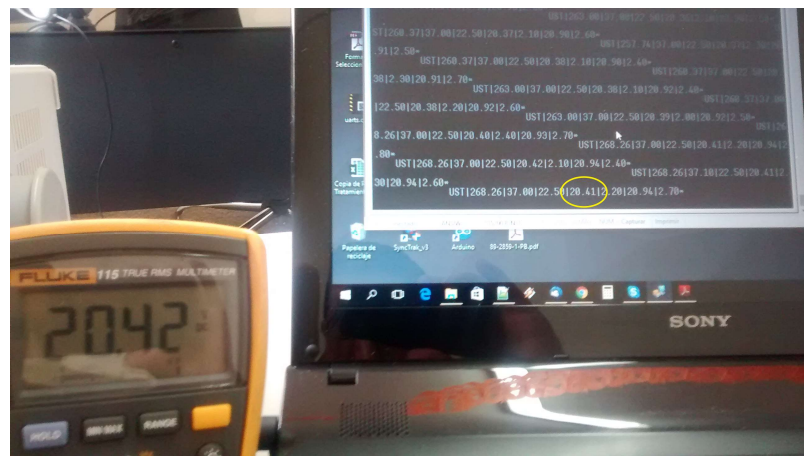


Figura 48 Verificación sensor de Voltaje de panel solar policristalino

Así mismo se verifica la precisión de la medición de la corriente de salida de los paneles a través del sensor INA219. Se mide la corriente del panel monocristalino con carga, donde se mide una corriente de 0.774 amperios con el multímetro Fluke y se coteja con la lectura hecha por el sensor Adafruit INA219 que nos da una corriente de 0,776 amperios, contando con un error de 0,002 amperios en la lectura de la corriente.

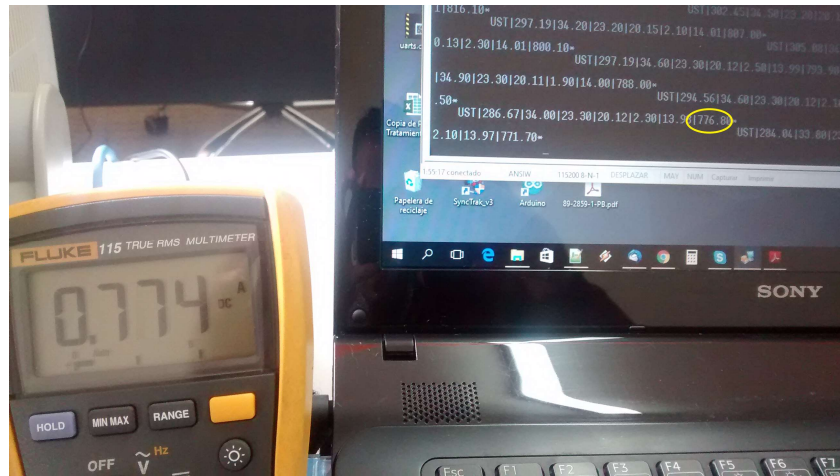


Figura 49 Verificación sensor de corriente de panel solar monocristalino

3.2 Validación de Mediciones de variables climáticas

Fecha y hora Bogotá	Velocidad Viento m/s	Pluviometría mm	Irradiancia W/m2	Humedad Relativa %	Temperatura °C
24/10/2016 15:02	1,46	0,2	52,6	60,8	20,8
24/10/2016 15:03	1,46	0,4	47,34	62,9	20,5
24/10/2016 15:05	1,46	0,8	44,71	65,3	20,1
24/10/2016 15:07	1,46	0,2	44,71	62,5	19,8
24/10/2016 15:09	1,46	0,6	42,08	63	19,4
24/10/2016 15:11	2,19	0,8	44,71	63,9	19
24/10/2016 15:12	1,46	0,6	36,82	65,6	18,7
24/10/2016 15:15	2,91	0,8	47,34	69,5	18,2
24/10/2016 15:17	1,46	1,4	52,6	67,5	18
24/10/2016 15:19	1,46	2	63,12	68	17,9
24/10/2016 15:21	0,73	1,2	65,75	71,8	17,8
24/10/2016 15:23	0	2,4	65,75	72,7	17,5
24/10/2016 15:24	0	2	63,12	73,4	17,4
24/10/2016 15:26	0	1,6	63,12	69	17,4
24/10/2016 15:28	0	1,2	60,49	72,3	17,5
24/10/2016 15:30	0,73	0,8	65,75	70,4	17,3
24/10/2016 15:32	1,46	0,8	76,27	69,9	17,1

Tabla 10 Variables climáticas medidas para verificación

Para verificar que los valores de medición de las variables climáticas registradas por la estación meteorológica se encuentren dentro de los rangos correctos, se registran todas las variables climáticas y se comparan con los registros oficiales tomados en las mismas fechas por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia).

En la Tabla 10 se presentan solo algunos de los registros representativos donde hay variación de todas las variables registradas por la estación meteorológica, aunque en la estación los registros se tomaron cada dos minutos y las gráficas de las variables se hacen con el muestreo a esta misma tasa para compararlos con los registros del IDEAM.

3.2.1 Irradiancia

Como referencia para la medición de la Irradiancia registrada por el sensor de radiación solar Davis 6425, se consulta los registros de radiación solar en la ciudad de Bogotá disponibles en el Atlas de radiación solar del IDEAM.

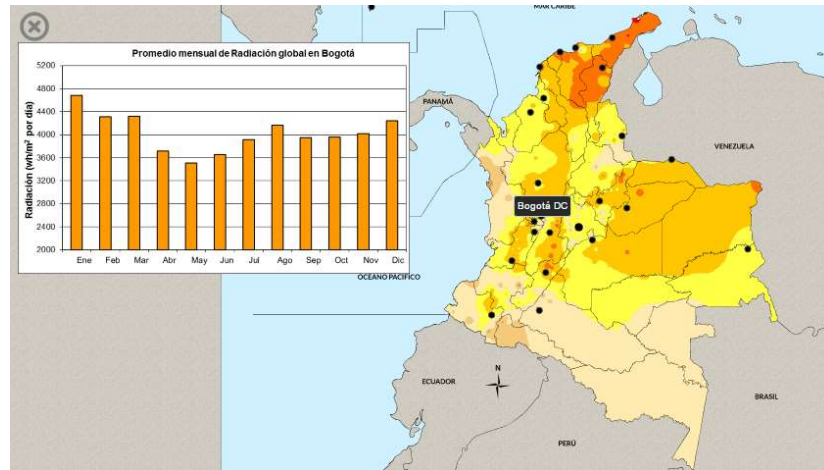


Figura 50 Irradiación Solar en Bogotá tomada del Atlas del IDEAM

Como la salida del sensor de radiación solar Davis 6425 es de 1.67 mV por cada W/m², se hace una conversión análoga a digital a través de un canal ADC con una resolución de 10 bits, aplicando un filtro digital pasa bajo para suavizar la señal. El filtro usa el valor actual y anterior de la conversión ADC con un valor de filtro (0,2) que determina la respuesta. Luego se registra el valor de la irradiancia en la base de datos de la estación Owasys junto con las demás variables climáticas.

$$\text{Irradiancia} = (\text{ADC}[n] * (1 - \text{ValorFiltro})) + (\text{ADC}[n-1] * \text{ValorFiltro});$$

Debido a que los registros del IDEAM acerca de la irradiancia en la ciudad de Bogotá se encuentran en valor promedio mensual por horas, se toman todos los valores de irradiancia registrados por la estación meteorológica durante el mes de octubre y se sacan los promedios diarios por horas para tener un parámetro de comparación. En la Tabla 11 se tienen los valores promedios de irradiancia del mes de octubre en la franja horaria de 10:00 am a 11:00 am donde se alcanzan los valores más altos de irradiación en la ciudad de Bogotá según los registros del IDEAM.

Dia	Prom Irrad	Dia	Prom Irrad	Dia	Prom Irrad
1	499,081177	11	281,967879	21	317,050909
2	342,673529	12	544,170909	22	413,877879
3	896,320968	13	492,573333	23	314,939091
4	240,179032	14	414,419394	24	712,326061
5	610,753871	15	761,962727	25	500,154546
6	267,780968	16	548,744849	26	350,452424
7	289,160323	17	547,314242	27	470,474242
8	625,006774	18	457,091212	28	269,682727
9	322,641613	19	283,18303	29	362,412121
10	276,659032	20	221,262424	30	304,99697

Tabla 11 Promedio diario de Irradiancia octubre 10-11am

En la Figura 51 se presentan los valores de irradiancia en la franja horaria entre 10:00 am y 11:00 am durante el mes de octubre en la ciudad de Bogotá, donde se obtiene una irradiancia media de 464,23 W/m² (línea naranja).

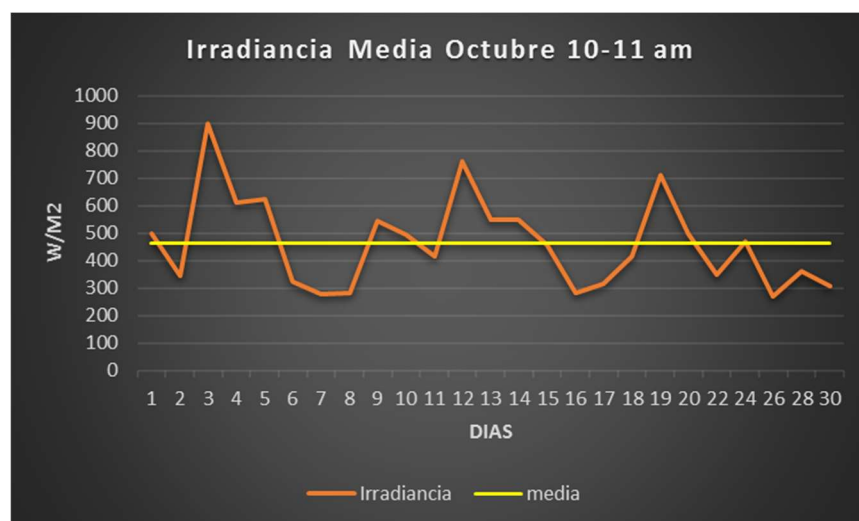


Figura 51 Irradiancia diaria registrada por estación meteorológica

Teniendo los registros de irradiancia promedio por hora del IDEAM (Tabla 12) tomados de la estación meteorológica de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá), se comparan con los datos tomados por la estación del proyecto dentro del mismo periodo de tiempo. Se verifica por ejemplo que la Irradiancia en el mes de octubre comienza a registrar valores mayores a 1W/m² entre las 5 y 6 de la mañana y vuelve a decrecer a valores menores de 1W/m² entre las 5 y 6 de la tarde, al igual que el valor máximo de irradiancia alcanzado en el mes de octubre se encuentra entre las 10 y 11 de la mañana.

De estos mismos registros, tomados en el mes de octubre del 2016 por la estación meteorológica, entre las 10 y 11 de la mañana, se obtuvo una radiación solar media de 464,23 Wh/m². Se comparó este valor con el valor promedio del IDEAM en el mes de octubre en la misma franja horaria de 10 a 11 am (encerrado en azul Tabla 12). El valor de irradiancia registrado por el IDEAM fue de 501,8Wh/m², mientras que el de la estación meteorológica fue de 464,23 Wh/m². Con lo anterior se tuvo una diferencia de 37,57 Wh/m² entre las

mediciones, con lo cual se pudo verificar que la medición de la estación meteorológica se encuentra un 7% alejada del valor promedio registrado por el IDEAM en la ciudad de Bogotá en el mismo periodo de tiempo. Este 7% se podría dar debido a la precisión del sensor de Irradiancia que es de $\pm 5\%$ y adicionalmente a que las dos estaciones comparadas se encuentran a más de 4 Km de distancia donde las condiciones pueden variar.

ESTACION UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (BOGOTÁ)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m ²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
1-2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4	0,4
2-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,4	0,2	0,3	0,3
3-4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
4-5	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3
5-6	0,2	0,1	0,3	1,3	2,5	1,9	1,2	1,2	2,0	3,0	2,7	0,7
6-7	31,8	28,1	39,5	52,9	66,3	62,0	55,2	50,6	60,2	71,0	61,4	50,2
7-8	184,9	162,3	149,3	177,2	188,3	188,0	191,0	172,9	180,6	205,6	198,3	208,9
8-9	351,3	342,2	264,3	309,3	294,4	291,3	313,7	290,8	284,5	346,4	356,3	378,8
9-10	507,6	455,8	366,7	388,1	391,4	389,5	399,7	387,8	399,5	457,6	458,6	504,3
10-11	589,9	543,7	469,8	425,6	431,5	447,8	476,8	467,0	460,2	501,8	519,1	545,5
11-12	607,4	544,1	483,3	433,2	455,7	497,2	520,6	491,4	489,4	458,0	488,2	533,5
12-13	560,1	503,8	433,2	412,9	464,7	490,0	544,6	494,3	481,1	442,4	414,1	491,1
13-14	475,7	465,6	389,8	365,9	404,2	476,3	499,4	457,5	432,5	393,3	355,3	423,4
14-15	375,9	357,0	313,5	307,7	334,2	391,8	404,2	392,0	398,2	315,9	274,7	348,9
15-16	304,4	275,2	231,1	225,1	245,4	275,5	292,9	305,2	298,4	209,9	188,3	254,7
16-17	171,2	145,7	145,0	135,4	143,1	158,6	177,2	168,1	168,4	111,0	90,2	124,9
17-18	46,4	48,7	47,7	35,6	35,7	46,3	59,4	48,9	34,5	16,7	13,0	26,0
18-19	0,5	0,9	0,7	0,2	0,3	0,5	1,1	0,9	0,4	0,3	0,4	0,4
19-20	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2
20-21	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3
21-22	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2
22-23	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3
23-0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2
Acumulada diaria	4207,3	3873,1	3334,2	3270,4	3457,9	3716,7	3937,1	3728,5	3690,0	3533,0	3420,7	3891,2



Tabla 12 Registro IDEAM promedio horario de la radiación en Bogotá

3.2.2 Velocidad del viento

Como referencia para la medición de la velocidad del viento registrada por el anemómetro WS603B de AAG, se consulta los registros históricos de velocidad del viento en la ciudad de Bogotá disponibles en el Atlas climático del IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.

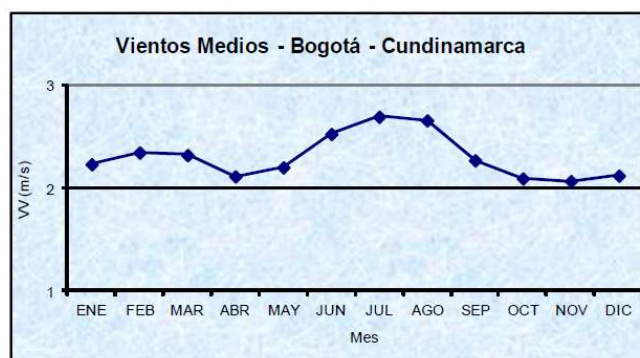


Figura 52 Velocidad del viento promedio en Bogotá, tomada del IDEAM

De acuerdo a los registros tomados del Atlas climático del IDEAM se aprecia que la velocidad del viento en la ciudad de Bogotá esta por el orden de 2 metros por segundo en la misma temporada del año (octubre) en que se están tomando las mediciones con el anemómetro WS603B.

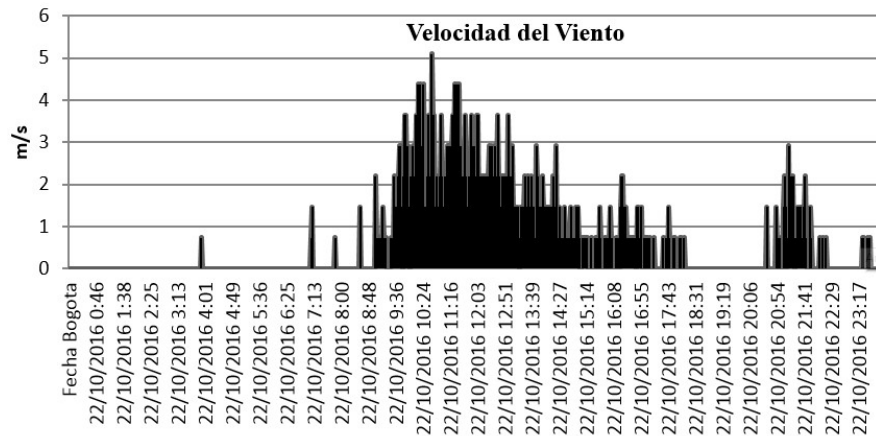


Figura 53 Mediciones de velocidad del viento en estación meteorológica

En la Figura 53 se puede ver el comportamiento de la velocidad del viento en un día de octubre en la ciudad de Bogotá, donde se tuvo una velocidad máxima de 5,1 m/s, sin embargo, se hace un promedio con la velocidad diaria del mes de octubre para poder compararlos con los registros obtenidos del Atlas climático del IDEAM, el cual presenta un promedio de 2 metros por segundo en el mismo periodo.

Dias	m/s	Dias	m/s	Dias	m/s
1	1,8112	11	1,6287	21	1,2528
2	1,3594	12	1,0874	22	1,4356
3	1,7336	13	1,2251	23	0,8495
4	1,1363	14	1,4838	24	1,0505
5	1,4444	15	1,0948	25	1,2544
6	1,2695	16	1,9363	26	1,3255
7	1,0428	17	2,244	27	0,9909
8	1,4974	18	1,8595	28	1,4669
9	1,0395	19	1,1305	29	1,2966
10	1,2335	20	1,2733	30	1,304

Tabla 13 Viento Promedio diario octubre

De los registros de velocidad media diaria se obtiene un valor general para del mes de octubre, el cual corresponde a 1,36 m/s como se muestra en la Figura 54. Este valor se diferencia en 0,64 m/s lo que representa un 32%. Aunque la precisión del anemómetro esta por el orden de $\pm 5\%$, la diferencia del 32% es debido a que el anemómetro se encuentra a una altura de 4 metros sobre el nivel del suelo y a 2 metros de los paneles solares, mientras que el anemómetro del IDEAM se debe encontrar a una altura de 10 metros, que es lo que

establece la Organización Mundial de Meteorología y a esta altura los vientos son más persistentes.

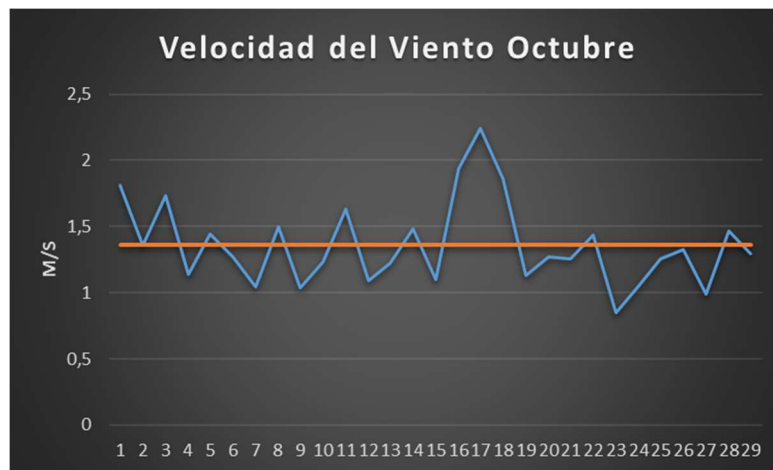


Figura 54 Velocidad del viento media de octubre

3.2.3 Temperatura

Como referencia para la medición de la temperatura registrada por el sensor de temperatura AM2302, se consulta los registros de temperatura en la ciudad de Bogotá disponibles en el Atlas climático del IDEAM en la misma época de toma de las muestras.

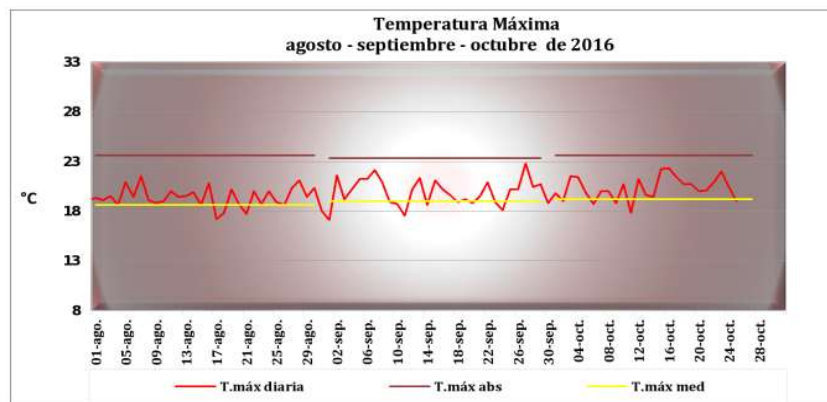


Figura 55 Gráficos IDEAM de Variabilidad Diaria de Temperatura

De acuerdo al gráfico de temperatura de la estación del aeropuerto el Dorado en Bogotá tomado de los registros del IDEAM, se puede apreciar que la temperatura máxima para el día 24 de octubre fue de 22°C.

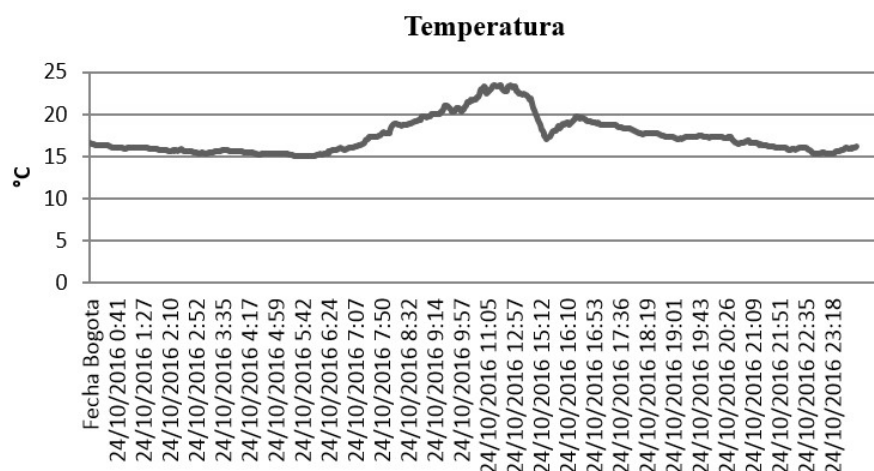


Figura 56 Medición Temperatura Estación Meteorológica

De acuerdo a los datos recopilados del día 24 de octubre por la estación del proyecto se tiene un registro de temperatura máxima de 22,8°C entre las 10:00 am y 11:00 am, lo cual difiere 0,8°C con los registros del IDEAM. De acuerdo a la precisión del sensor de temperatura la cual es de $\pm 1^\circ\text{C}$ la diferencia estaría dentro de los valores esperados.

3.2.4 Humedad Relativa

Como referencia para la medición de la humedad relativa registrada por el sensor de humedad AM2302, se consulta los registros históricos de humedad en la ciudad de Bogotá disponibles en el Atlas climático del IDEAM, donde se puede apreciar que la humedad relativa en Bogotá en el mes de octubre esta sobre el 83%.

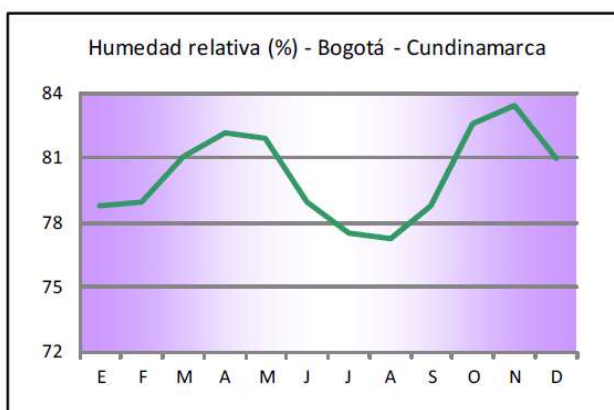


Figura 57 Registros históricos IDEAM de humedad relativa en Bogotá

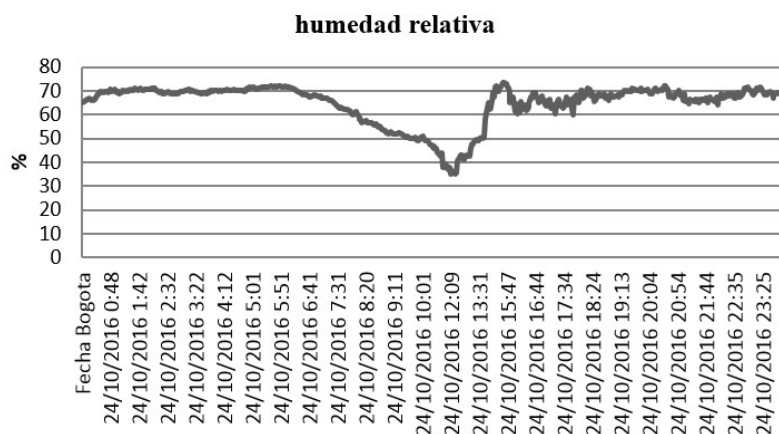


Figura 58 Medición Humedad relativa Estación Meteorológica

De los registros de humedad relativa tomados por la estación del proyecto se sacan los registros diarios del mes de octubre para poder obtener un valor medio con el cual se puedan comparar contra los registros del IDEAM.

Dia	%HR	Dia	%HR	Dia	%HR
1	63	11	71,7	21	89,8
2	67	12	77,62	22	85,22
3	71,1	13	91,36	23	83,8
4	67,3	14	84,5	24	89,02
5	73,8	15	78,82	25	78,18
6	77	16	73,88	26	77,06
7	90,5	17	72,9	27	81,38
8	82	18	70,24	28	71,92
9	81,4	19	82,12	29	74,98
10	74,9	20	90,36	30	82,68

Tabla 14 Humedad Relativa Octubre

A partir de los registros diarios de humedad relativa durante el mes de octubre, se obtiene un valor medio de 78,68%, el cual difiere de 4,32% con los registros del IDEAM que a su vez representa una diferencia de 5%. La especificación de precisión del sensor es de $\pm 2\%$, sin embargo, al igual que con el anemómetro la humedad se ve disminuida por encontrarse cerca a los paneles solares.

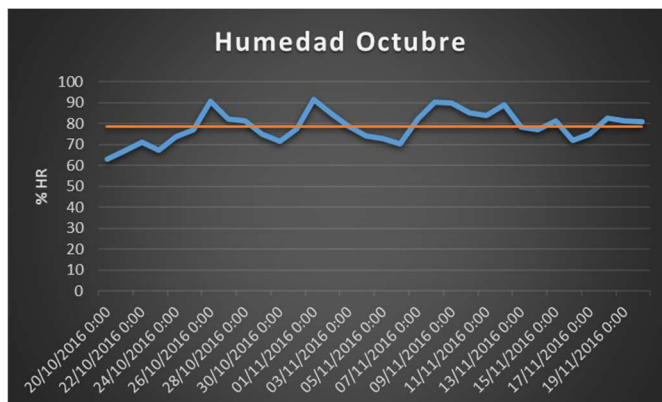


Figura 59 Humedad Relativa Octubre

3.2.5 Pluviometría

Como referencia para la medición de la precipitación registrada por el sensor de pluviometría Davis 7852, se consulta los registros históricos de pluviometría en la ciudad de Bogotá disponibles en el Atlas climático del IDEAM.

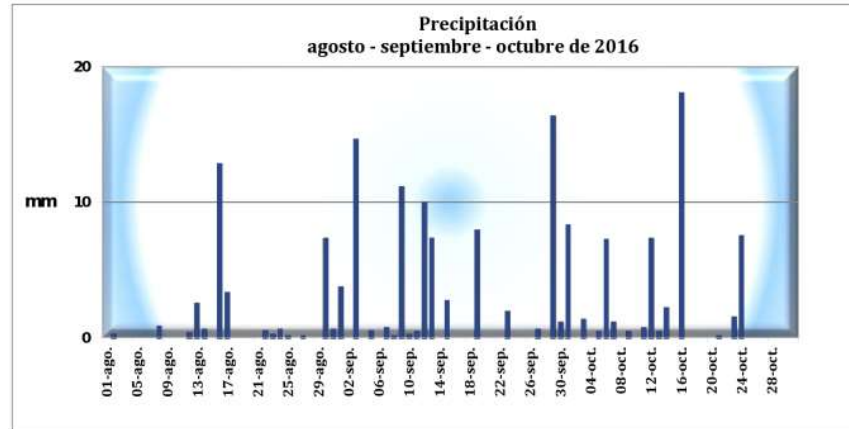


Figura 60 Registros históricos IDEAM de pluviometría en Bogotá

De los registros del IDEAM de precipitación en Bogotá se encuentran datos diarios desde el mes de agosto, donde se puede apreciar que la precipitación medida en Bogotá el día 24 del mes de octubre fue aproximadamente de 9mm. Por lo tanto, se toman los valores registrados por la estación meteorológica de este mismo día para hacer la comparación. De acuerdo a la información registrada en la estación se obtuvo un valor total de 11 mm de precipitación, teniendo una diferencia de 2 mm con la información obtenida del IDEAM. La precisión del pluviómetro es de máximo de $\pm 5\%$ y la diferencia con los registros del IDEAM es del 18%, sin embargo, se debe precisar que la toma de información difiere debido a la ubicación de la estación del IDEAM y la del proyecto que distan entre si más de 4 Km.

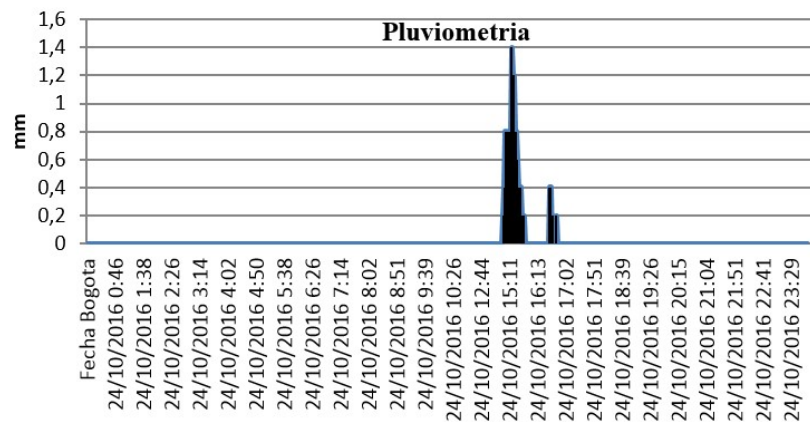


Figura 61 Medición Pluviometría Estación Meteorológica

4. Pruebas y Resultados

Una vez implementada la estación meteorológica con la interfaz de potencia y validado todas las mediciones, se comienzan a registrar todas las variables cada dos minutos a partir del día 20 de octubre. Los registros almacenados en el archivo Log de la estación incluyen los datos de hora y fecha, velocidad del viento (m/s), pluviometría (mm), Irradiancia (W/m2), humedad relativa (%), Temperatura (°C), Voltaje (V) y Corriente de salida (mA) del panel monocristalino, Voltaje (V) y Corriente de salida del panel policristalino (mA). El registro viene con un encabezado “UST” y cada variable está separada por el carácter ‘|’ de manera que luego se pueda exportar a Excel de una manera fácil. Cada registro se almacena con el siguiente formato:

UST|20/10/2016 15:16:48|1,46|0,00|220,92|41,50|21,50|12,63|580,40|12,38|612,60

El archivo Log es extraído de la estación a través de una conexión por el puerto serial de programación de la plataforma Owasys Owa33. Se realiza una conexión por un programa “hyperterminal” que permite el envío de comandos tipo Linux para la transferencia de archivos a una tasa de 115kbps.

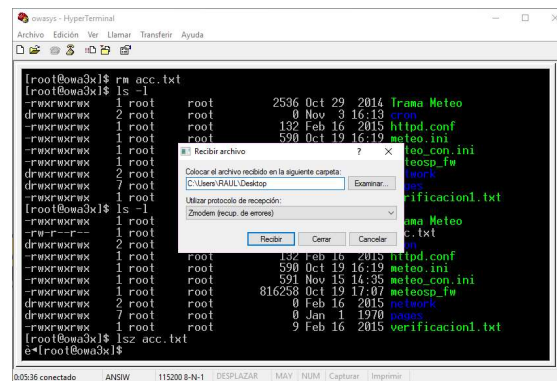


Figura 62 Programa terminal descarga de Log

El archivo Log de la estación meteorológica llamado “acc.txt”, es descargado diariamente y exportado a un archivo de Excel donde se halla la potencia de salida de cada panel a partir del voltaje y corriente. Adicionalmente se hace un ajuste a la fecha y hora del Log debido a que el tiempo del sistema operativo de la unidad Owasys se sincroniza con la fecha UTC (Universal Time Coordinate) la cual esta adelantada 5 horas con respecto a la hora local de Bogotá.

En el campo “Fecha Bogotá” se encuentra la hora local del sitio donde se hacen las pruebas, en el campo “Vel” la velocidad del viento, en el campo “pluvi” el valor de la pluviometría, en el campo “Irradian” el valor de la irradiancia, en el campo “humed” el valor de la humedad relativa, en el campo “Temp” el valor de la temperatura, en el campo “Vp1” el voltaje de salida del panel policristalino, en el campo “Cp1” la corriente de salida del panel policristalino, en el campo “Vp2” el voltaje de salida del panel monocristalino, en el campo

“Cp2” la corriente de salida del panel monocristalino. Una vez se tiene los registros en Excel se pueden obtener las gráficas del comportamiento de las variables y a la vez exportar los datos al software Matlab para hacer un análisis más profundo de la información.

Fecha Bogotá	Vel	Pluvi	Irradian	Humed	Temp	Vp1	Cp1	Vp2	Cp2
20/10/2016 10:07	1,46	0	946,8	42,6	21,3	13,51	1532	12,82	1678,3
20/10/2016 10:18	1,46	0	1054,63	41,2	21,6	13,6	1678	12,88	1726
20/10/2016 10:22	1,46	0	991,51	40,8	22	13,57	1415	12,84	1528,7
20/10/2016 10:24	2,19	0	1009,92	39,1	21,9	13,63	1612	12,93	1777,4
20/10/2016 10:25	2,91	0	1017,81	38,9	21,8	13,65	1367,3	12,85	1483,9
20/10/2016 10:40	1,46	0	1033,59	40,5	21,6	13,72	1678	12,88	1709
20/10/2016 10:42	1,46	0	1057,26	39,7	22,5	13,78	1689,4	12,94	1717,6
20/10/2016 10:44	1,46	0	1099,34	38,1	23,2	13,81	1590,2	12,91	1603,7
20/10/2016 10:49	0,73	0	1123,01	37,2	23,6	13,84	1586	12,91	1637,8
20/10/2016 11:04	2,19	0	1175,61	40,4	21,6	14,07	1634	12,98	1749,2
20/10/2016 11:05	3,64	0	1199,28	39,1	22,2	14,12	1690,5	13	1701,7
20/10/2016 11:07	1,46	0	1133,53	39	22,7	14,04	1420	12,96	1590,1
20/10/2016 11:09	2,19	0	1154,57	38	23,5	14,08	1430	12,94	1514,7
20/10/2016 11:35	1,46	0	1172,98	40,5	21,3	14,39	1671	13,02	1774
20/10/2016 14:24	1,46	0	965,21	40,7	22,1	14,09	1482,4	13	1539,1

Tabla 15 Formato archivo Log exportado a Excel

4.1 Relación Variables Climáticas

Como se determinó previamente en el marco teórico la variable que determina la generación de energía en los paneles solares es la Irradiancia, de hecho, la eficiencia en los paneles viene dada por la potencia de entrada que corresponde a la Irradiancia (W/m^2) sobre la potencia de salida determinada por el voltaje y corriente del panel solar. Por tal razón se realizaron algunas graficas que muestran la relación existente entre las variables climáticas y la Irradiancia para observar el impacto que pueden tener sobre la potencia generada en los paneles. Se seleccionan diferentes días para las gráficas donde algunas condiciones sean más relevantes que las otras. Por ejemplo, para el grafico de temperatura se selecciona un día sin lluvia y despejado mientras que para el grafico de pluviometría se selecciona un día con bastante precipitación.

4.1.1 Irradiancia y Temperatura

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 20 de octubre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo secas y un cielo despejado, favoreciendo las condiciones para buenos niveles de Irradiancia y así mismo una temperatura cálida para la ciudad de Bogotá.

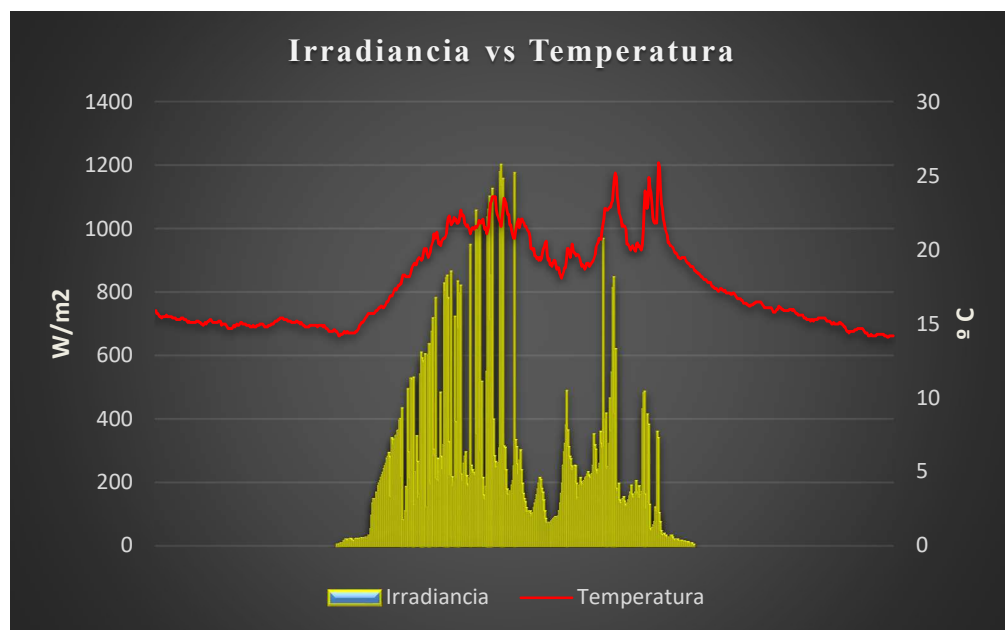


Figura 63 Comportamiento de la Irradiancia y Temperatura

En la gráfica se aprecia que los niveles de la Irradiancia se comportan con correspondencia a los niveles de la temperatura, logrando observar que cuando sube la Irradiancia también sube la temperatura. En la parte izquierda de la gráfica se encuentra la escala de la Irradiancia en W/m^2 donde se puede ver que la variable llega hasta los $1200W/m^2$. En la parte derecha tenemos la escala de la temperatura en $^{\circ}C$ donde se puede apreciar que la variable llega a tener picos de $25^{\circ}C$ cuando los niveles de Irradiancia son máximos. Los máximos niveles de Irradiancia se tienen alrededor de las 11:00 am.

Fecha Bogotá	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp
20/10/2016 11:04	2,19	0	1175,61	40,4	21,6
20/10/2016 11:05	3,64	0	1199,28	39,1	22,2
20/10/2016 11:35	1,46	0	1172,98	40,5	21,3

Tabla 16 Registros máximos de Irradiancia y temperatura

4.1.2 Irradiancia y Pluviometría

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 26 de octubre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo nublado con lluvia, produciendo bajos niveles de Irradiancia.

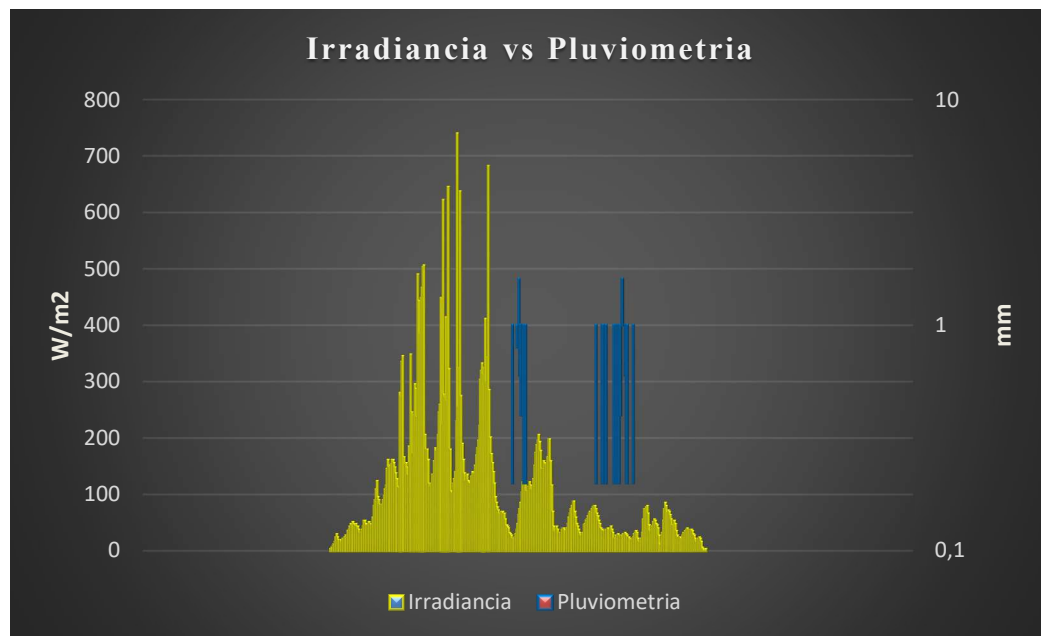


Figura 64 Comportamiento de la Irradiancia y Pluviometría

En la gráfica se aprecia que los niveles de Irradiancia (amarillo) bajan ostensiblemente cuando empieza a caer la lluvia (azul). En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la Irradiancia en W/m^2 la cual se puede ver que llega hasta los $750 W/m^2$. En la parte derecha tenemos la escala de la pluviometría logrando niveles máximos de 1.6 mm de lluvia en tan solo 2 minutos que es el tiempo de muestreo. En este día la estación meteorológica registro un total de 13.8 mm de precipitación.

Fecha Bogotá	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp
26/10/2016 11:47	2,19	1	47,34	79,2	16,4
26/10/2016 11:49	2,19	1,6	63,49	84	16,1
26/10/2016 14:55	1,46	1	26,3	79,6	15,9

Tabla 17 Registros máximos de pluviometría

4.1.3 Irradiancia y Humedad Relativa

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 27 de octubre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo nublado, pero sin lluvia, produciendo bajos niveles de Irradiancia y así mismo altos niveles de humedad para la ciudad de Bogotá.

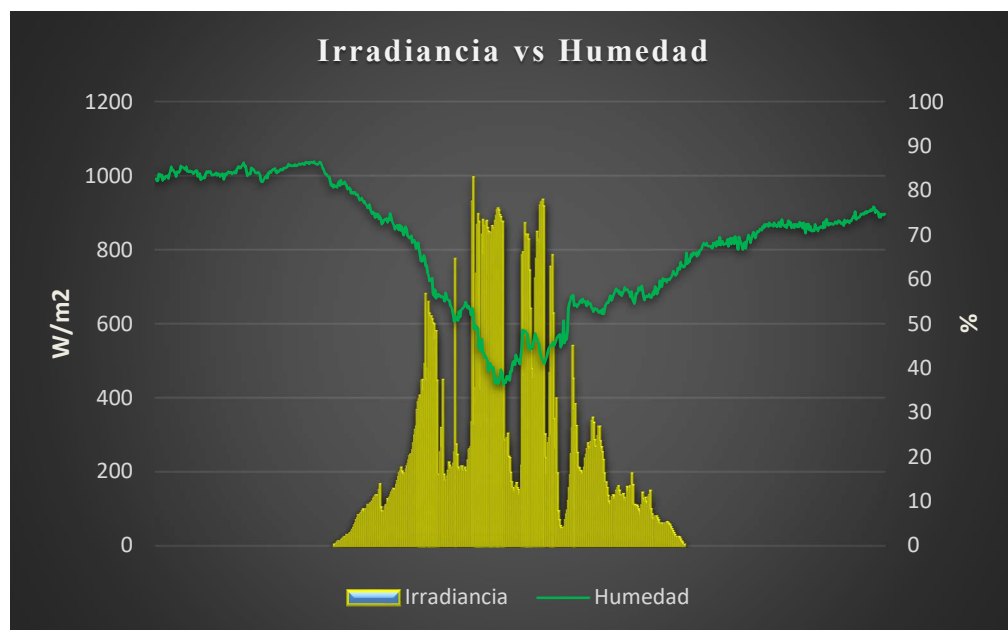


Figura 65 Comportamiento de la Irradiancia y Humedad

En la gráfica se aprecia que los niveles de la Irradiancia (amarillo) suben cuando baja la humedad relativa (verde). En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la Irradiancia en W/m² la cual se puede ver que llega hasta los 1000 W/m². En la parte derecha tenemos la escala de la humedad relativa logrando niveles máximos del 90% y mínimos del 41.2% al medio día.

Fecha Bogotá	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp
27/10/2016 10:25	0	0	994,14	48,8	21,8
27/10/2016 12:45	1,46	0	928,39	41,7	26,4
27/10/2016 12:46	2,19	0	933,65	41,2	26,4

Tabla 18 Registros mínimos de humedad relativa

4.1.4 Irradiancia y Velocidad del Viento

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 22 de octubre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo con fuertes vientos y tiempo seco para la ciudad de Bogotá.

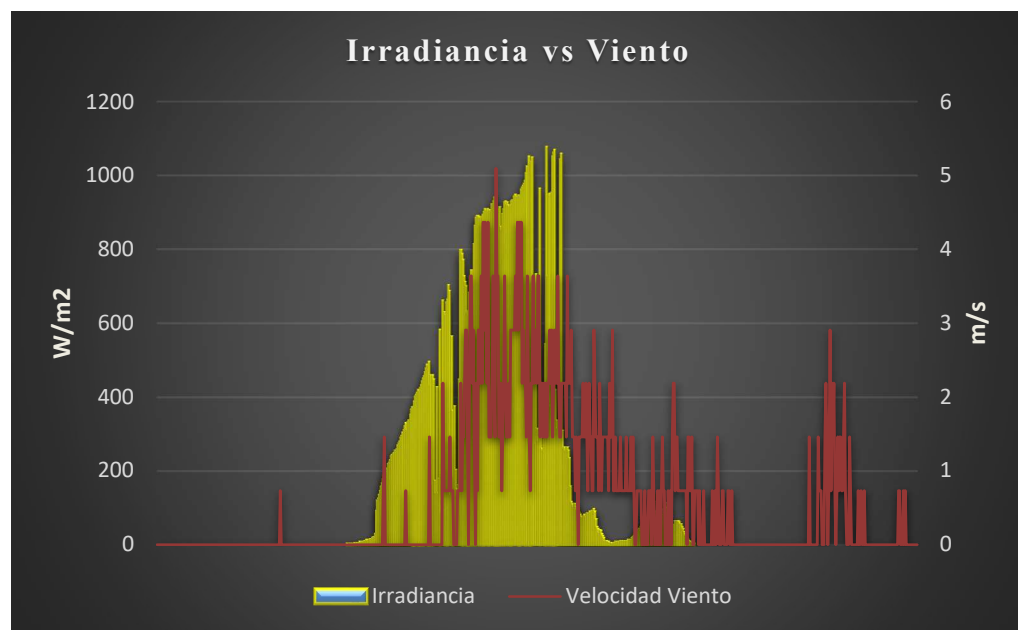


Figura 66 Comportamiento de la Irradiancia y la Velocidad del Viento

En la gráfica se aprecia que los niveles de la Irradiancia (amarillo) suben ostensiblemente cuando aumenta la velocidad del viento (café). En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la Irradiancia en W/m^2 la cual se puede ver que llega hasta los $1075 W/m^2$. En la parte derecha tenemos la escala de la velocidad del viento logrando niveles máximos del $5.1 m/s$.

Fecha Bogotá	vel	Pluv	Irradian	humed	Temp
22/10/2016 10:16	4,37	0	891,57	38,2	22,7
22/10/2016 10:20	4,37	0	907,35	38,8	22,7
22/10/2016 10:26	4,37	0	907,35	37,4	22,7
22/10/2016 10:40	5,1	0	938,91	36,2	24,2
22/10/2016 11:25	4,37	0	941,54	33,1	25,1

Tabla 19 Registros máximos de Velocidad del Viento

4.2 Relación de Variables Climáticas con Potencia Generada

Una vez se consideró la relación entre las variables climáticas y la Irradiancia, se pasa a considerar la potencia generada por los dos paneles ante las diferentes condiciones ambientales.

4.2.1 Potencia Generada por los paneles de acuerdo a la Irradiancia

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 29 de octubre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo nublado con leves lluvias para la ciudad de Bogotá.

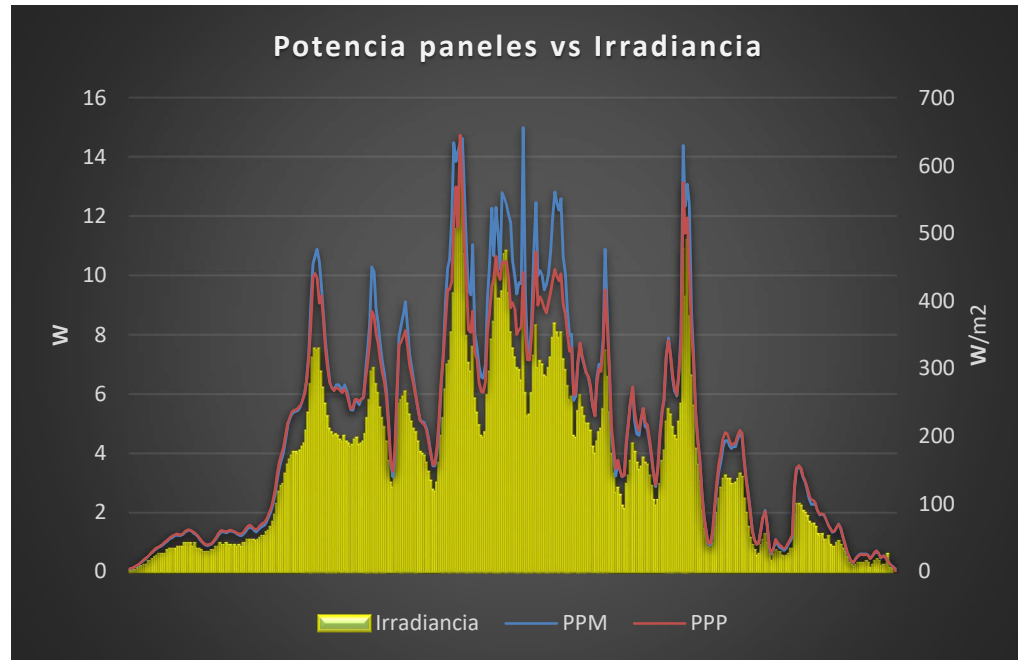


Figura 67 Comportamiento de Potencia de los paneles y de la Irradiancia

En la gráfica se compara la potencia generada tanto en el panel monocristalino (azul) como en el panel policristalino (rojo) de acuerdo con la Irradiancia (amarillo). Se aprecia que los niveles de potencia de los dos paneles siguen el mismo patrón de la Irradiancia. También se puede ver que el panel monocristalino entrega mayor potencia en los valores máximos de la Irradiancia. En la parte derecha de la gráfica esta la escala de la Irradiancia, la cual alcanza máximo los 600 W/m². En la parte izquierda se tiene la escala de la Potencia registrada por los paneles, donde se puede observar que los paneles logran máximo hasta 15 vatios de potencia de salida.

4.2.2 Potencia Panel Monocristalino e Irradiancia

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 20 de octubre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo despejado sin lluvia para la ciudad de Bogotá.

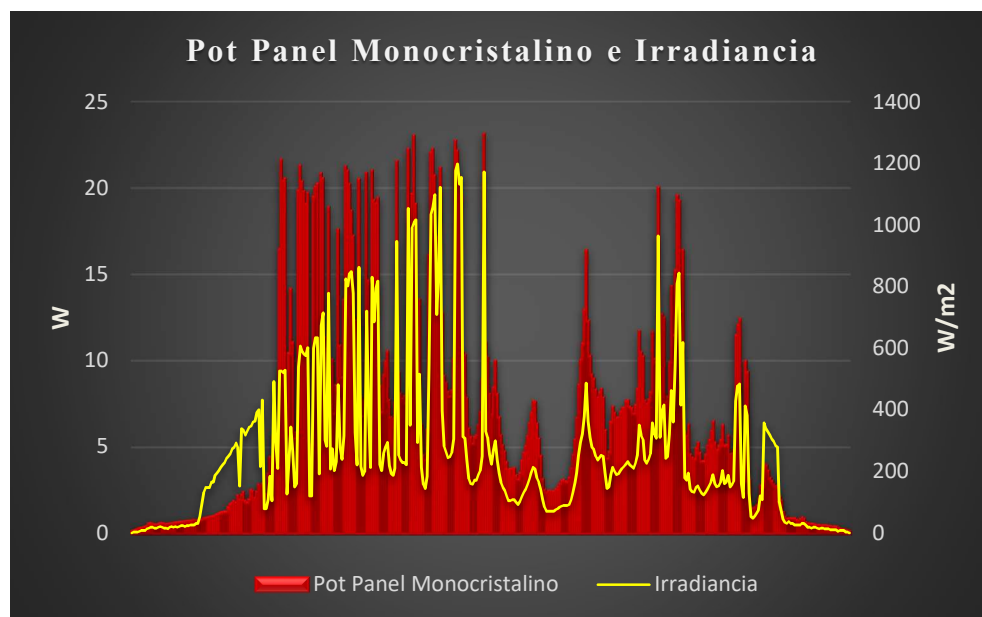


Figura 68 Comportamiento de Potencia de panel Monocristalino e Irradiancia

En la gráfica se puede apreciar la relación entre la Irradiancia (amarillo) y la potencia generada del panel monocristalino (rojo), donde los niveles máximos de la Irradiancia coinciden con los de la máxima potencia del panel. En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la potencia del panel solar monocristalino, la cual se puede ver que llega hasta los 23 W. En la parte derecha tenemos la escala de la Irradiancia logrando niveles máximos de 1175 W/m².

Fecha Bogotá	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Ppm
20/10/2016 10:18	1,46	0	1054,63	41,2	21,6	22,23088
20/10/2016 10:24	2,19	0	1009,92	39,1	21,9	22,981782
20/10/2016 10:42	1,46	0	1057,26	39,7	22,5	22,225744
20/10/2016 11:04	2,19	0	1175,61	40,4	21,6	22,704616
20/10/2016 11:35	1,46	0	1172,98	40,5	21,3	23,09748

Tabla 20 Registros de Potencia Panel Monocristalino e Irradiancia

De la misma manera se realiza una gráfica que relaciona directamente las dos variables, la potencia del panel monocristalino en función de la Irradiancia para observar directamente la influencia que ejerce la irradiancia en la potencia de salida del panel solar.

A partir de la información obtenida de graficar estas dos variables se hace una regresión polinómica para determinar una función que relacione las dos variables.

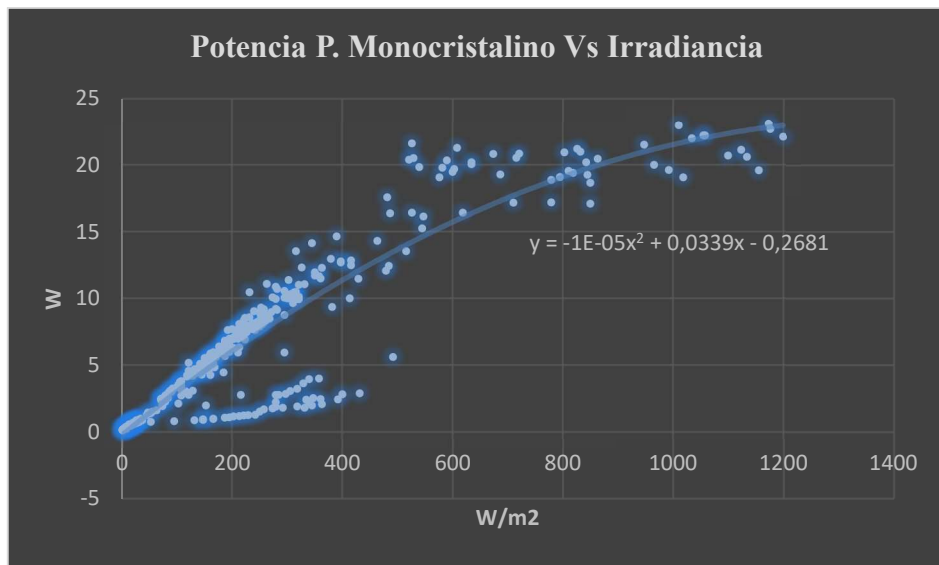


Figura 69 Potencia P. Monocristalino vs Irradiancia

La función obtenida a partir de la regresión polinómica de la gráfica de Potencia en Panel Monocristalino en función de la Irradiancia es:

$$y = -1E-05x^2 + 0,0339x - 0,2681$$

4.2.3 Potencia Panel Monocristalino y Temperatura

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 30 de octubre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo seco para la ciudad de Bogotá, con temperatura máxima de 25°C.

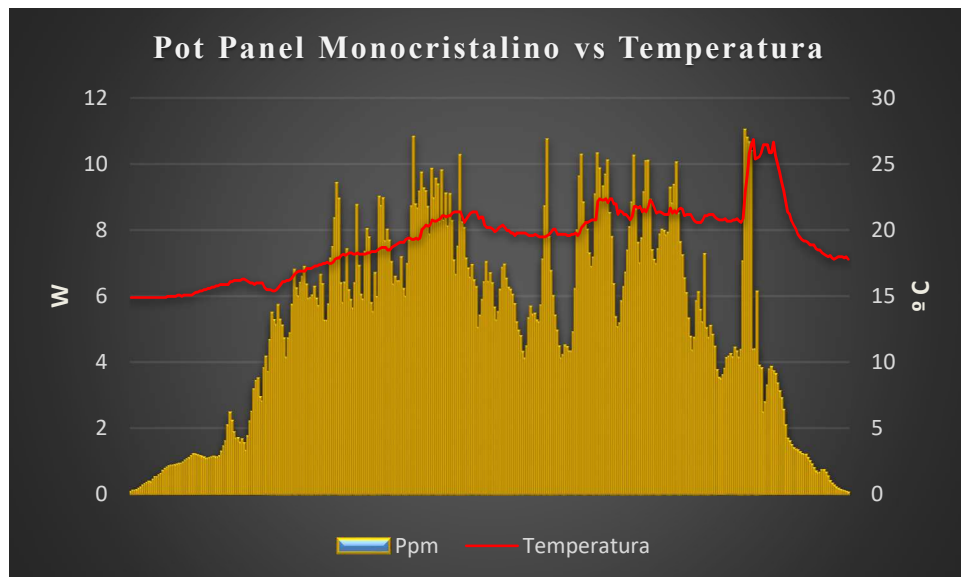


Figura 70 Comportamiento de Potencia de panel Monocristalino y Temperatura

En la gráfica se puede apreciar la relación entre la temperatura (rojo) y la potencia generada del panel monocristalino (naranja), donde los niveles máximos de la temperatura coinciden con los de la potencia del panel. En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la potencia del panel solar monocristalino, la cual se puede ver que llega hasta los 11 W. En la parte derecha tenemos la escala de la temperatura logrando niveles máximos de 25°C.

Fecha Bogotá	vel	Plu	Irradia	hume	Tem	Ppm
30/10/2016 9:55	0	0	383,98	53,7	19,3	10,81
30/10/2016 12:18	1,46	0	368,2	52,7	19,6	10,73
30/10/2016 15:43	1,46	0	497,07	44	23	11,02
30/10/2016 15:45	1,46	0	494,44	42,3	24,2	10,78

Tabla 21 Registros de Potencia Panel Monocristalino y Temperatura

4.2.4 Potencia Panel Monocristalino y Velocidad del Viento

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 30 de octubre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo despejado para la ciudad de Bogotá.

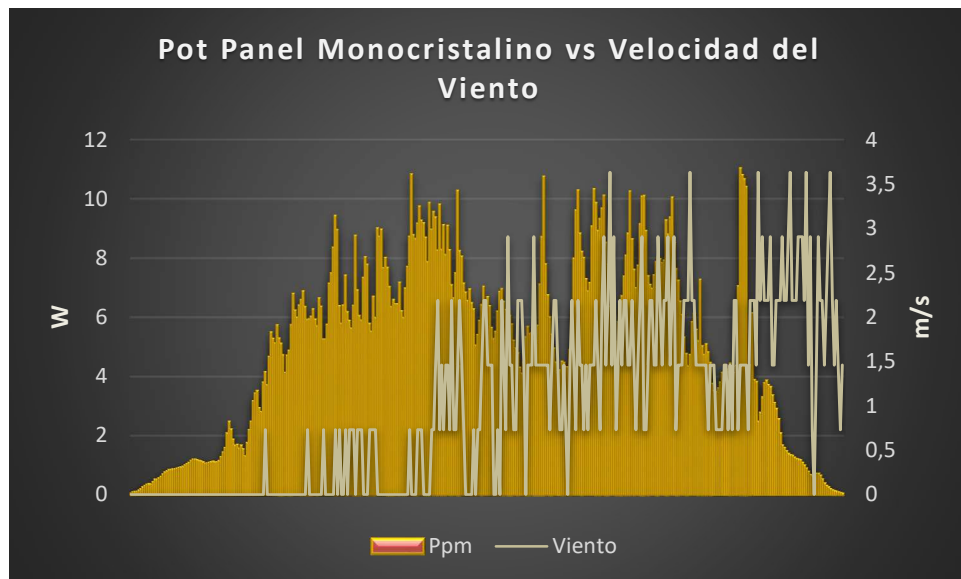


Figura 71 Comportamiento de Potencia de panel Monocristalino y Velocidad del Viento

En la gráfica se puede apreciar la relación entre la velocidad del viento (gris) y la potencia generada del panel monocristalino (naranja), donde no se ve una relación directa entre la velocidad del viento y la potencia del panel. En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la potencia del panel solar monocristalino, la cual se puede ver que llega hasta los 11 W. En la parte derecha tenemos la escala de la velocidad del viento que llega hasta una velocidad de 3.64 m/s.

Fecha Bogota	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Ppm
30/10/2016 13:34	3,64	0	215,66	44	22	6,344195
30/10/2016 14:52	3,64	0	152,54	47,8	20,7	4,71468
30/10/2016 16:22	3,64	0	244,59	33,3	26,5	2,457441
30/10/2016 16:51	3,64	0	44,71	48,9	20,1	1,33161
30/10/2016 17:06	3,64	0	28,93	53,2	18,9	0,887876

Tabla 22 Registros de Potencia Panel Monocristalino y Velocidad del Viento

4.2.5 Potencia Panel Monocristalino y Pluviometría

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 26 de octubre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo con fuertes lluvias para la ciudad de Bogotá.

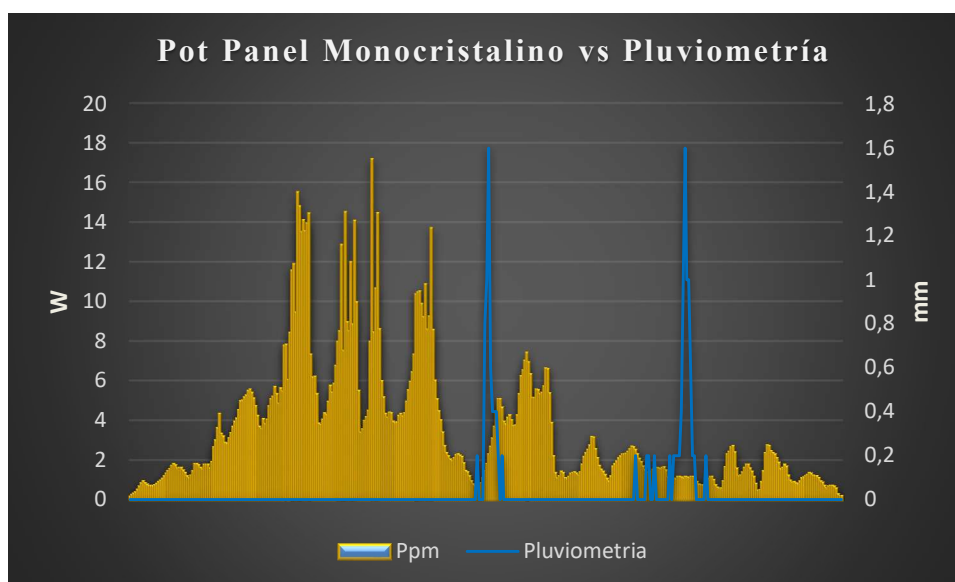


Figura 72 Comportamiento de Potencia de panel Monocristalino y Pluviometría

En la gráfica se puede apreciar la relación entre la pluviometría (azul) y la potencia generada del panel monocristalino (naranja), donde los niveles máximos de la pluviometría coinciden con los niveles más bajos de la potencia del panel. En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la potencia del panel solar monocristalino, la cual se puede ver que llega hasta los 17 W. En la parte derecha tenemos la escala de la pluviometría logrando niveles máximos de 1.6 mm.

Fecha Bogota	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Ppm
26/10/2016 11:45	1,46	0,8	36,82	74,6	17	1,408848
26/10/2016 11:47	2,19	1	47,34	79,2	16,4	1,795752
26/10/2016 11:49	2,19	1,6	63,49	84	16,1	2,27354
26/10/2016 14:55	1,46	1	26,3	79,6	15,9	1,063705

Tabla 23 Registros de Potencia Panel Monocristalino y Pluviometría

4.2.6 Potencia Panel Monocristalino y Humedad

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 2 de noviembre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo con nublado para la ciudad de Bogotá.

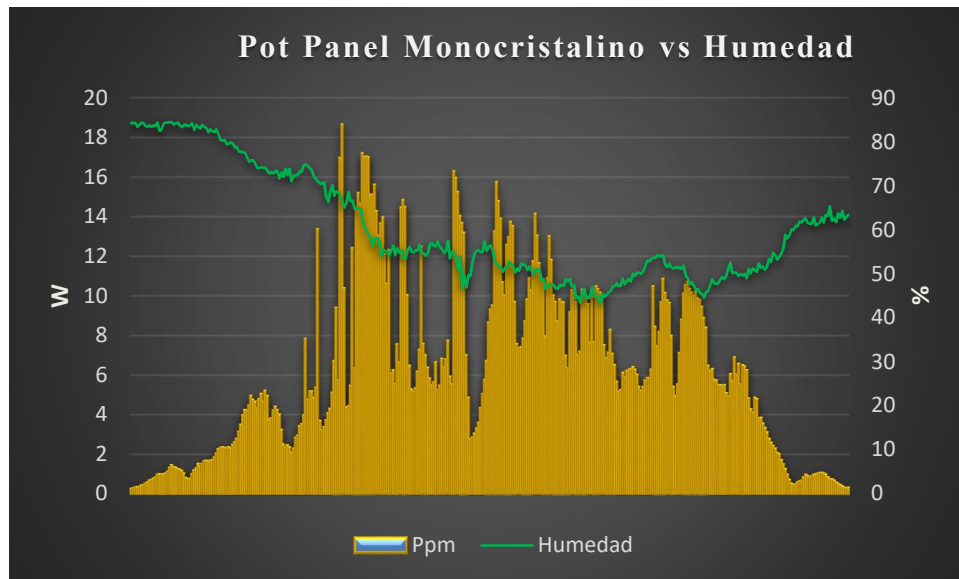


Figura 73 Comportamiento de Potencia de panel Monocristalino y Humedad Relativa

En la gráfica se puede apreciar la relación entre la humedad (verde) y la potencia generada del panel monocristalino (naranja), donde los niveles máximos de la humedad coinciden con los niveles más bajos de la potencia del panel. En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la potencia del panel solar monocristalino, la cual se puede ver que llega hasta los 19 W. En la parte derecha tenemos la escala de la humedad relativa logrando niveles mínimos de 58%.

Fecha Bogota	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Ppm
02/11/2016 9:13	0	0	648,55	67,48	17,44	16,954056
02/11/2016 9:14	0	0	661,96	66,34	17,7	18,6286206
02/11/2016 9:33	0	0	699,57	61,96	19,34	17,17504
02/11/2016 9:35	0	0	706,14	60,46	19,02	17,0064279
02/11/2016 9:37	0	0	730,34	59,66	19,28	17,0200884
02/11/2016 9:39	0	0	766,11	58,64	19,5	16,9760145

Tabla 24 Registros de Potencia Panel Monocristalino y Humedad Relativa

4.2.7 Potencia Panel Policristalino e Irradiancia

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 3 de noviembre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo despejado para la ciudad de Bogotá.

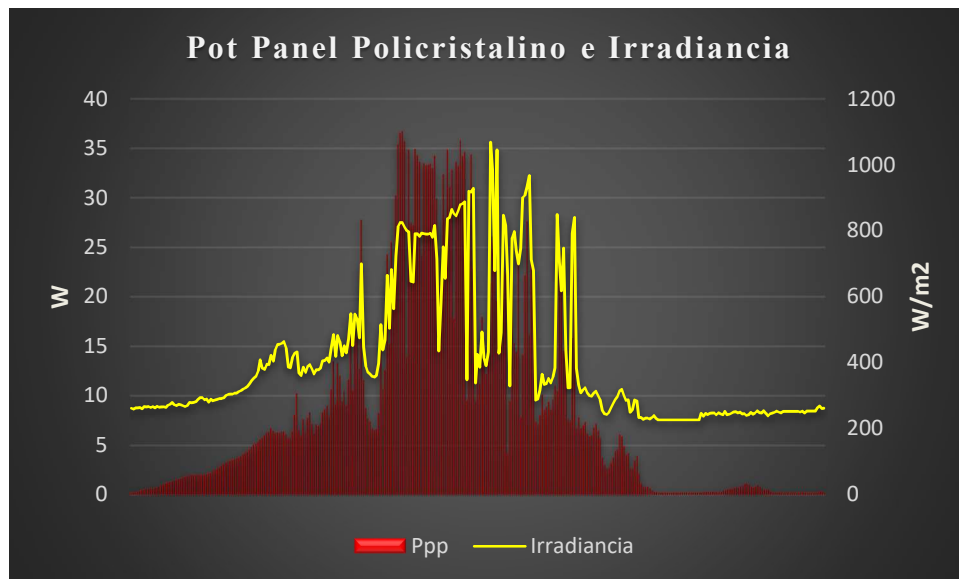


Figura 74 Comportamiento de Potencia de Panel Policristalino e Irradiancia

En la gráfica se puede apreciar la relación entre la Irradiancia (amarillo) y la potencia generada del panel policristalino (rojo), donde se puede apreciar que los niveles de la Irradiancia siguen el patrón de comportamiento de la potencia del panel. En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la potencia del panel solar policristalino, la cual se puede ver que llega hasta los 34 W. En la parte derecha tenemos la escala de la Irradiancia logrando niveles máximos de 1068 W/m².

Fecha Bogotá	Vel	Pluvi	Irradian	Humed	Temp	Ppp
03/11/2016 10:58	0,73	0	919,66	42,34	25	24,8907768
03/11/2016 11:00	0,73	0	917,29	41,34	25,1	34,3873761
03/11/2016 11:02	0,73	0	928,34	41,26	25,4	22,848848
03/11/2016 11:21	0,73	0	1068,51	41,38	24,7	21,402224
03/11/2016 11:23	0,73	0	983,57	41,58	25,2	26,133786

Tabla 25 Registros de Potencia Panel Policristalino e Irradiancia

De la misma manera se realiza una gráfica que relaciona directamente las dos variables, la potencia del panel policristalino en función de la Irradiancia para observar directamente la influencia que ejerce la irradiancia en la potencia de salida del panel solar.

A partir de la información obtenida de graficar estas dos variables se hace una regresión polinómica para determinar una función que relacione las dos variables.

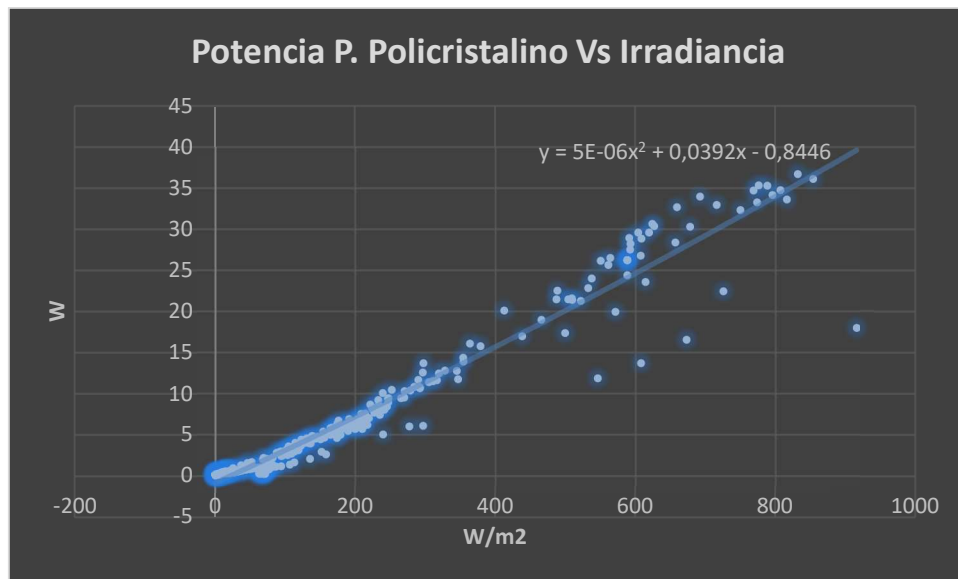


Figura 75 Potencia P. Policristalino vs Irradiancia

La función obtenida a partir de la regresión polinómica de la gráfica de Potencia en Panel Policristalino en función de la Irradiancia es:

$$y = 5E-06x^2 + 0,0392x - 0,8446$$

4.2.8 Potencia Panel Policristalino y Temperatura

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 4 de noviembre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo despejado para la ciudad de Bogotá.

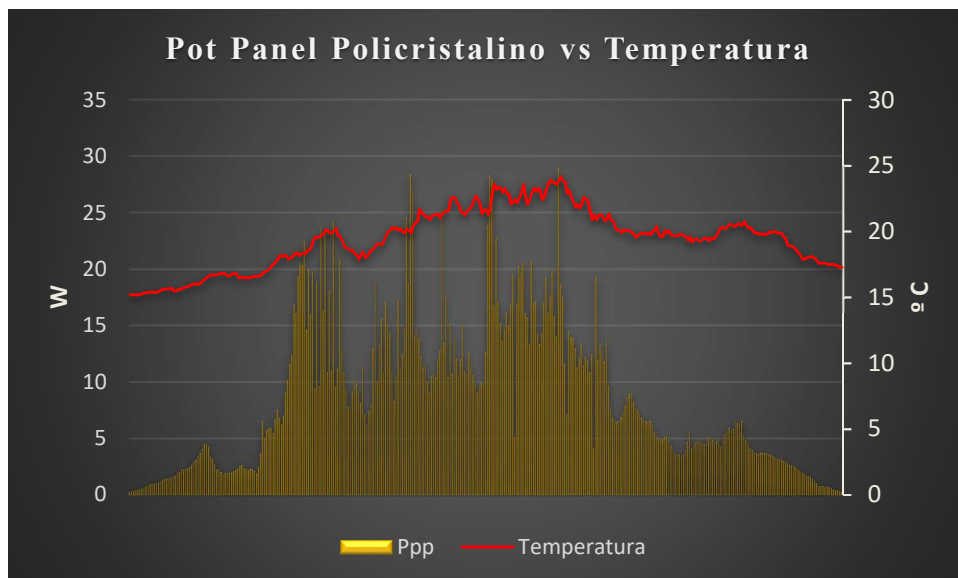


Figura 76 Comportamiento de Potencia de panel Policristalino y Temperatura

En la gráfica se puede apreciar la relación entre la temperatura (rojo) y la potencia generada del panel Policristalino (naranja), donde los niveles máximos de la temperatura coinciden con los de la potencia del panel. En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la potencia del panel solar policristalino, la cual se puede ver que llega con picos hasta los 28 W. En la parte derecha tenemos la escala de la temperatura logrando niveles máximos de 24°C.

Fecha Bogotá	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Ppp
04/11/2016 9:06	1,46	0	704	54,74	20,06	24,1898904
04/11/2016 10:17	1,46	0	771,06	52,3	19,9	28,3148544
04/11/2016 10:19	0,73	0	760,01	52,94	20,4	26,8767315
04/11/2016 10:48	0,73	0	725,82	49,08	21,36	25,2216192
04/11/2016 11:40	1,46	0	701,1	47,54	21,26	23,8530192
04/11/2016 11:47	1,46	0	765,8	46,14	22,98	27,8271066

Tabla 26 Registros de Potencia Panel Policristalino y Temperatura

4.2.9 Potencia Panel Policristalino y Velocidad del Viento

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 5 de noviembre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo despejado y fuertes vientos para la ciudad de Bogotá.

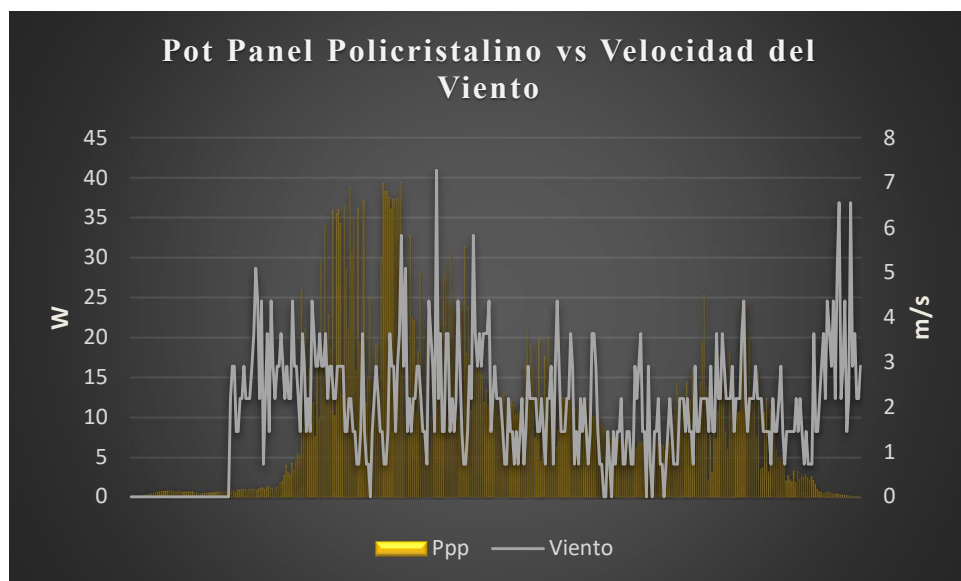


Figura 77 Comportamiento de Potencia de panel Policristalino y Velocidad del Viento

En la gráfica se puede apreciar la relación entre la velocidad del viento (gris) y la potencia generada del panel monocristalino (naranja), donde no se ve una relación directa entre la velocidad del viento y la potencia del panel. En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la potencia del panel solar monocristalino, la cual se puede ver que llega hasta los 40 W.

En la parte derecha tenemos la escala de la velocidad del viento que llega hasta una velocidad de 7.28 m/s.

Fecha Bogotá	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Ppp
05/11/2016 7:40	5,1	0	299,75	63,08	15,56	1,0414326
05/11/2016 9:59	5,83	0	823,91	52,66	19,24	39,401082
05/11/2016 10:03	5,1	0	242,68	52,16	19,38	10,0505538
05/11/2016 10:34	7,28	0	420,21	50,44	19,4	13,2517044
05/11/2016 11:09	5,83	0	710,56	48,6	20,62	15,562456
05/11/2016 17:06	5,1	0	13,34	53	17,84	0,4541552

Tabla 27 Registros de Potencia Panel Policristalino y Velocidad del Viento

4.2.10 Potencia Panel Policristalino y Pluviometría

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 7 de noviembre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo con fuertes lluvias para la ciudad de Bogotá.

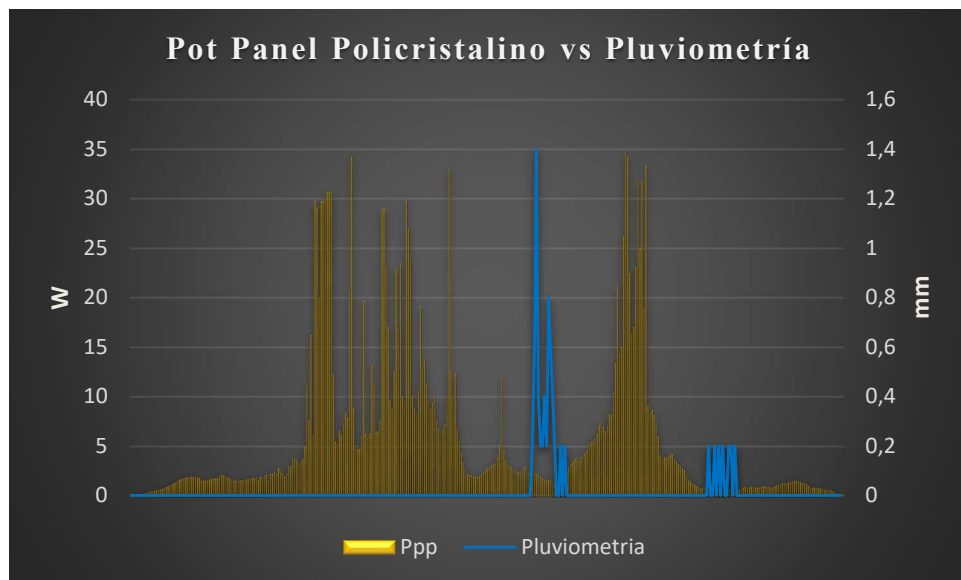


Figura 78 Comportamiento de Potencia de panel Policristalino y Pluviometría

En la gráfica se puede apreciar la relación entre la pluviometría (azul) y la potencia generada del panel policristalino (naranja), donde los niveles máximos de la pluviometría coinciden con los niveles más bajos de la potencia del panel. En la parte izquierda de la gráfica esta la escala de la potencia del panel solar monocristalino, la cual se puede ver que llega hasta los 35 W. En la parte derecha tenemos la escala de la pluviometría logrando niveles máximos de 1.4 mm.

Fecha Bogotá	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Ppp
07/11/2016 12:07	1,46	0,6	58,04	70,18	19,5	2,1907665
07/11/2016 12:09	1,46	1,4	58,3	70,54	19,2	2,196077
07/11/2016 12:24	0,73	0,8	39,63	75,26	17,8	1,569111

Tabla 28 Registros de Potencia Panel Policristalino y Pluviometría

4.2.11 Potencia Panel Policristalino y Humedad Relativa

La siguiente grafica corresponde a registros tomados el día 9 de noviembre del 2016 donde se tuvo condiciones de tiempo nublado para la ciudad de Bogotá.

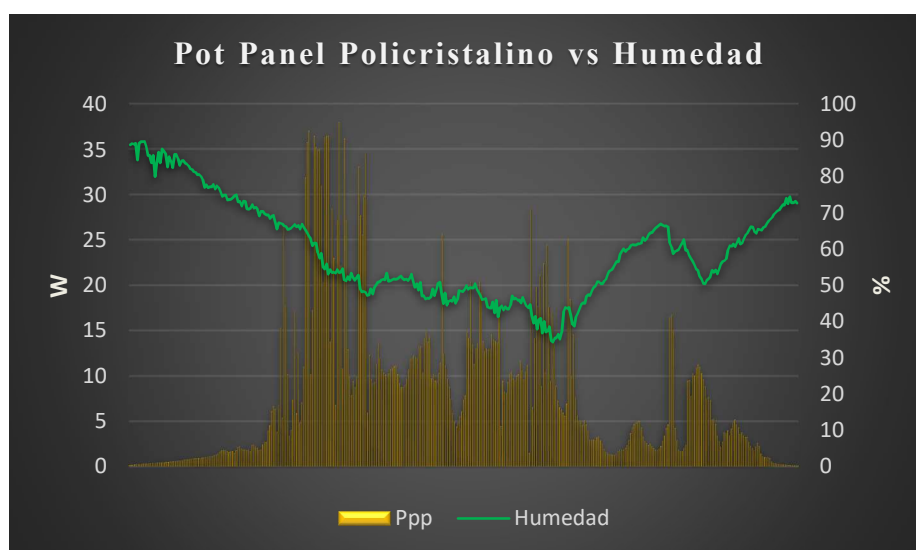


Figura 79 Comportamiento de Potencia de panel Policristalino y Humedad Relativa

En la gráfica e puede apreciar que los niveles máximos de la humedad (verde) coinciden con los niveles más bajos de la potencia del panel (naranja). Se puede ver que la potencia del panel solar monocristalino llega hasta los 35 W mientras que la humedad relativa logra niveles mínimos de 35%.

Fecha Bogota	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Ppp
09/11/2016 9:00	0,73	0	681,08	61,72	19,6	36,4444306
09/11/2016 9:13	2,19	0	716,85	55,94	21,22	36,388275
09/11/2016 9:15	0,73	0	736,31	53,12	21,5	36,460428

Tabla 29 Registros de Potencia Panel Policristalino y Humedad Relativa

5. Análisis de Resultados

Una vez graficada la relación existente entre las diferentes variables climáticas (temperatura, humedad, lluvia y viento) con la Irradiancia y después de hacer un análisis preliminar del impacto que tienen dichas variables sobre la potencia de salida de los paneles, tanto monocristalino como policristalino, se procede a hacer un análisis más determinante a partir de la información recopilada por la estación meteorológica.

Para este nuevo análisis se hace uso de la herramienta estadística PCA (Análisis de Componentes Principales) para poder determinar qué tipo de impacto tiene cada variable climática sobre la eficiencia de los paneles solares. Por lo tanto, se hacen análisis diferenciales, tomando registros de días en los que algunas variables climáticas tuvieron más relevancia que otras, como por ejemplo días en los que la lluvia fue determinante y otros donde el clima fue seco.

Para poder hacer el análisis PCA se deben seleccionar los observadores, los cuales para este caso son los registros de tiempo donde se correlacionan las variables. Debido a que los registros fueron tomados cada 2 minutos, lo cual resulta excesivo para este análisis, se decide sacar un promedio por hora de las variables, donde cada hora será un observador del PCA. Las horas seleccionadas son las que tienen valores significantes de Irradiancia, es decir, no se tendrán en cuenta las horas donde la Irradiancia se aproxima a un valor nulo (Horas de oscuridad).

En el método para determinar los componentes principales primero se debe obtener la matriz de datos de entrada C_X . Cada columna de la matriz corresponde a un vector de características. Luego se debe computar la matriz de covarianza Σ_X . Esta matriz da información acerca de la independencia lineal entre las características. A partir de esta matriz se debe obtener los valores propios resolviendo la ecuación característica $(\lambda_i I - \Sigma_X) = 0$. Estos valores forman la matriz diagonal de covarianza Σ_Y . Ya que la matriz es diagonal, cada elemento es la varianza de los datos transformados. Después se deben obtener los vectores propios resolviendo w_i en $(\lambda_i I - \Sigma_X) w_i = 0$ para cada valor propio. Los vectores propios deberán ser normalizados linealmente independientes. La transformación W es obtenida considerando los vectores propios como sus columnas. Luego se deben obtener las características transformadas computando $c_Y = c_X W^T$. Las nuevas características son linealmente independientes. Para aplicaciones de Clasificación, se debe seleccionar las características con valores más grandes de λ_i , donde λ_i mide la varianza y las características que tienen el rango más grande de valores tendrán varianza más grande. Para compresión, se debe reducir la dimensionalidad de los nuevos vectores de las características ajustando a cero los componentes con bajo valor de λ_i . La característica en el espacio original de datos puede ser obtenido por $c_X^T = W^T c_Y^T$. (Mark Nixon, 2012).

Para realizar el análisis de componentes principales se utiliza el software Matlab, donde se hace uso de la función “princomp”, cuyo argumento de entrada consiste de una matriz $n \times m$ donde n es el número de observadores (Horas) y m el número de variables (Variables

Climáticas). La función “princomp” retorna una matriz “COEFF” $p \times p$ de los coeficientes de los componentes principales, donde cada columna contiene los coeficientes para un componente principal. Las columnas están en orden decreciente de acuerdo a la varianza del componente.

La función “princomp” también retorna otros parámetros como “SCORE”, el cual es la matriz de puntuación de los componentes principales, es la representación de la matriz de entrada en el espacio de componentes principales, donde las filas corresponden a las observaciones y las columnas a los componentes. Otro parámetro es “latent”, el cual es un vector que contiene los valores propios de la matriz de covarianza de los datos de entrada.

Debido a que las magnitudes de las variables son muy diferentes, como se ve en la Figura 80, se estandariza la información contenida en la matriz dividiendo cada columna por su desviación estándar, de esta forma la información contenida en la matriz se hace adimensional y disminuye las grandes diferencias entre las varianzas de las variables.

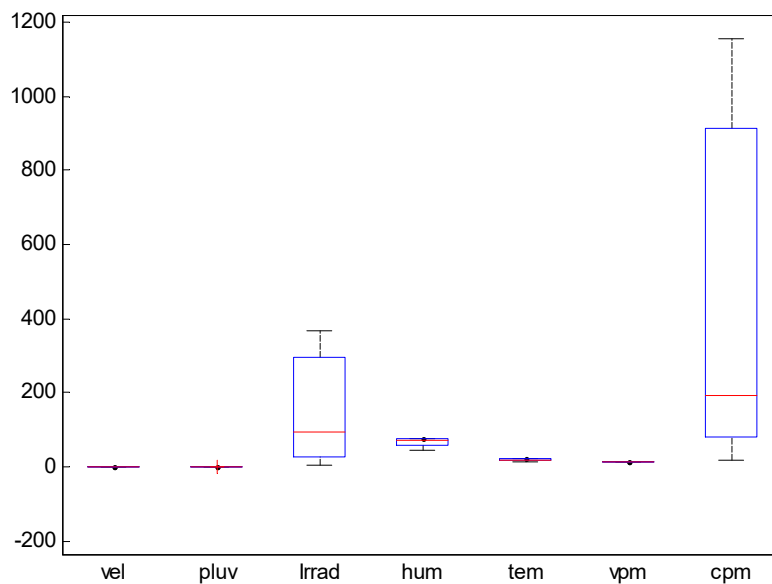


Figura 80 Magnitud de las variables climáticas y de potencia

5.1 Análisis de Componentes Principales

5.1.1 Panel Monocristalino e Irradiancia

El primer análisis de componentes principales se hace con relación al panel monocristalino con los registros del día 20 de octubre, donde se tuvo condiciones de tiempo seco con altos niveles de Irradiancia.

Observadores/Variables	Vel	Pluvi	Irradian	Humed	Temp	Vpm	Cpm
20/10/2016 5:58	0,15	0	2,63	61,46	14,32	11,55	18,22
20/10/2016 6:58	0	0	22,6339	60,921	14,85	11,64	53,0788
20/10/2016 7:59	0	0	255,508	54,688	16,76	11,83	146,958
20/10/2016 8:59	0,73	0	382,386	47,548	19,4	12,36	1025,46
20/10/2016 9:58	1,19	0	463,373	41,106	21,58	12,52	1073,68
20/10/2016 10:58	1,72	0	506,315	39,779	22,03	12,6	987,27
20/10/2016 11:59	2,07	0	371,848	38,858	21,91	12,55	761,071
20/10/2016 12:58	2,47	0	115,635	41,971	19,64	12,21	328,406
20/10/2016 13:59	2,23	0	231,517	46,344	19,22	12,43	625,865
20/10/2016 14:59	1,46	0	348,754	39,873	22	12,65	807,755
20/10/2016 15:59	2,55	0	197,951	40,68	21,33	12,36	470,787
20/10/2016 16:59	0,93	0	109,982	36,827	22,93	12,14	140,073
20/10/2016 17:35	0,35	0	10,2432	44,232	19,17	12,01	30,7842

Tabla 30 Datos de entrada PCA Panel Monocristalino – Irradiancia

En este primer análisis PCA se tomaron las variables ambientales de velocidad del viento, pluviometría, irradiancia, humedad y temperatura junto con las variables de salida del panel policristalino Vpm (Voltaje del panel monocristalino) y Cpm (Corriente Panel monocristalino).

Se ejecuta el siguiente código en Matlab donde la matriz de entrada, que corresponde a la Tabla 30, se encuentra en el archivo “datos1.dat”. Se estandariza la información contenida en la matriz dividiendo cada columna por su desviación estándar, de esta forma la información contenida en la matriz se hace adimensional y disminuye las grandes diferencias entre las varianzas de las variables:

```
load datos1.dat          %Se carga la matriz de entrada
stdr=std(datos1);        %Se halla la desviación estándar
stdr = 0.9399  0  173.2890  8.2744  2.7977  0.3658  403.9169      %desviación estándar
sr = datos1./repmat(stdr,13,1);                                %Se normaliza la matriz de entrada
[pc,score,latent,tsquare]=princomp(sr);                          %Se hallan los componentes principales
```

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
VEL.VIEN.	0,35	-0,4191	0,7939	0,2231	-0,1401	0,0459	0
PLUVIOM.	0	0	0	0	0	0	1
IRRADIAN.	0,3819	0,5661	-0,0489	0,717	0,0957	-0,0896	0
HUMEDAD.	-0,4154	0,4048	0,3724	0,0032	0,1018	0,7173	0
TEMPERAT.	0,4292	-0,2832	-0,4478	0,0841	-0,2622	0,6777	0
VOL.P.MON.	0,4649	0,038	0,0522	-0,3666	0,7958	0,1094	0
COR.P.MON	0,3984	0,5083	0,1592	-0,5428	-0,5087	-0,0642	0

Tabla 31 Coeficientes Componentes Principales Panel Monocristalino – Irradiancia

Range = cumsum(latent)./sum(latent); %Se hallan los pesos de los componentes principales
Range = 0.7499 0.9104 0.9834 0.9943 0.9985 1.0000 1.0000

De acuerdo al valor de Range, que corresponde a la suma acumulativa del vector Latent (valores propios de la matriz de covarianza de los datos de entrada), podemos ver que los componentes principales que son más relevantes son los dos primeros, con los cuales se alcanza el 91% de la información.

En este caso, vemos que PC1 tiene la mayor correlación positiva con las variables de potencia del panel monocristalino (voltaje y corriente), temperatura e irradiancia, mientras que tiene la mayor correlación negativa con la humedad. Por tanto, es claro que en condiciones de tiempo despejado la humedad es un factor que afecta determinantemente la eficiencia de los paneles. En cuanto a PC2, se aprecia que tiene la mayor correlación positiva con las variables de irradiancia y corriente mientras que tiene la mayor correlación negativa con el viento. Se procede a graficar la matriz “score” con los dos primeros componentes los cuales cuentan para el 91% de la varianza.

biplot(pc(:,1:2),'Scores',score(:,1:2),'VarLabels',{'vel' 'pluv' 'Irrad' 'hum' 'tem' 'vpm' 'cpm'})

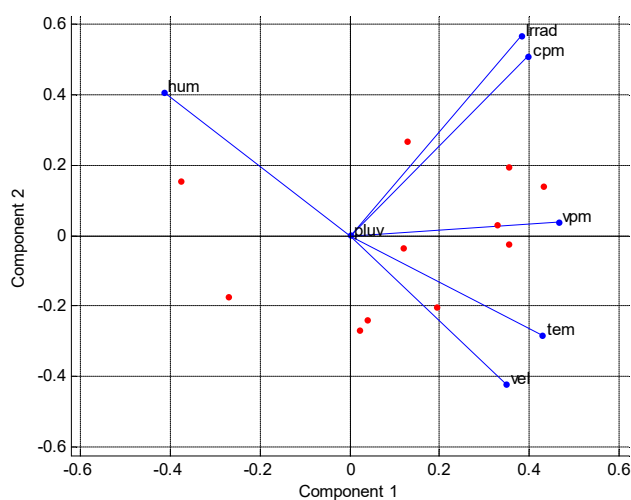


Figura 81 Grafica Componentes Principales Panel Monocristalino – Irradiancia

5.1.2 Panel Monocristalino y Temperatura

El siguiente análisis de componentes principales se hace con relación al panel monocristalino con los registros del día 30 de octubre, donde se tuvo condiciones de tiempo despejado con niveles cálidos de temperatura.

Observadores/Variables	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Vpm	Cpm
30/10/2016 5:59	0	0	5,66462	72,023	14,9	11,65	20,91
30/10/2016 6:59	0	0	39,7688	70,676	15,27	11,87	81,95
30/10/2016 7:59	0,02	0	143,295	67,676	15,95	12,11	261,3
30/10/2016 8:58	0,16	0	198,072	63,125	17,44	12,33	520,3
30/10/2016 9:59	0,21	0	237,522	56,581	18,73	12,24	597,6
30/10/2016 10:58	0,98	0	313,199	49,883	20,81	12,44	698,6
30/10/2016 11:58	1,07	0	197,951	49,63	20,36	12,21	489,5
30/10/2016 12:59	1,37	0	200,209	52,103	19,81	12,2	513
30/10/2016 13:57	1,79	0	280,205	47,204	21,65	12,43	631,2
30/10/2016 14:58	1,91	0	250,698	47,419	21,35	12,43	598,1
30/10/2016 15:59	1,3	0	195,01	44,774	21,87	12,18	444
30/10/2016 16:59	2,27	0	78,7805	46,832	21,08	11,92	141,2
30/10/2016 17:39	2,05	0	16,0191	54,055	18,3	11,83	42,42

Tabla 32 Datos de entrada PCA Panel Monocristalino – Temperatura

En este análisis PCA se tomaron las variables ambientales de velocidad del viento, pluviometría, irradiancia, humedad y temperatura junto con las variables de salida del panel policristalino Vpm (Voltaje del panel monocristalino) y Cpm (Corriente Panel monocristalino).

Se ejecuta el siguiente código en Matlab donde la matriz de entrada, que corresponde a la Tabla 32, se encuentra en el archivo “datos2.dat”. Se estandariza la información contenida en la matriz dividiendo cada columna por su desviación estándar, de esta forma la información contenida en la matriz se hace adimensional y disminuye las grandes diferencias entre las varianzas de las variables.

```
load datos2.dat           %Se carga la matriz de entrada
stdr=std(datos2);         %Se halla la desviación estándar
stdr = 0.8512  0  101.3736  9.6385  2.4814  0.2534  244.0984  %desviación estándar
sr = datos1./repmat(stdr,13,1);           %Se normaliza la matriz de entrada
[pc,score,latent,tsquare] = princomp(sr);   %Se hallan los componentes
principales
```

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
VEL.VIEN.	0,2721	0,6318	0,6355	-0,3334	0,1038	0,0319	0
PLUVIOM.	0	0	0	0	0	0	1
IRRADIAN.	0,4312	-0,3552	-0,0365	-0,1938	0,7342	-0,3315	0
HUMEDAD.	-0,423	-0,3696	0,3932	-0,1301	0,3395	0,6306	0
TEMPERAT.	0,4456	0,2886	-0,4082	0,2649	0,2241	0,6566	0
VOL.P.MON.	0,4266	-0,3425	0,5183	0,6184	-0,2228	0,0098	0
COR.P.MON	0,425	-0,3708	-0,0706	-0,6178	-0,4848	0,2454	0

Tabla 33 Coeficientes Componentes Principales Panel Monocristalino – Temperatura

Range = cumsum(latent)./sum(latent) %Se hallan los pesos de los componentes

Range = 0.7085 0.9750 0.9934 0.9972 0.9991 1.0000 1.0000

De acuerdo al valor de Range, que corresponde a la suma acumulativa del vector Latent (valores propios de la matriz de covarianza de los datos de entrada), podemos ver que los componentes principales que son más relevantes son los dos primeros, con los cuales se alcanza casi el 98% de la información.

De manera similar al caso anterior de PCA, donde las condiciones ambientales fueron de tiempo despejado, se ve que PC1 tiene la mayor correlación positiva con las variables de temperatura, Irradiancia y potencia del panel monocristalino (voltaje y corriente), mientras que tiene mayor correlación negativa con la humedad. Por tanto, se ve que en condiciones de tiempo despejado la humedad es un factor que afecta determinantemente la eficiencia de los paneles. En cuanto a PC2, se aprecia que tiene la mayor correlación positiva con la variable de velocidad del viento mientras que tiene la mayor correlación negativa con la corriente del panel monocristalino. Se procede a graficar la matriz “score” con los dos primeros componentes, los cuales cuentan para el 97% de la varianza.

biplot(pc(:,1:2),'Scores',score(:,1:2),'VarLabels',{'vel' 'pluv' 'Irrad' 'hum' 'tem' 'vpm' 'cpm'})

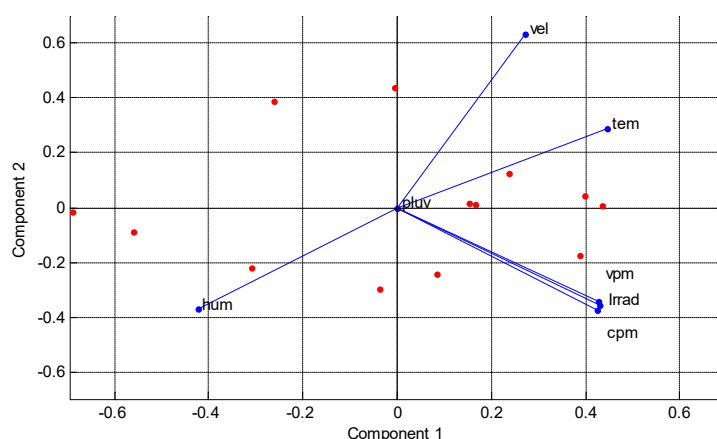


Figura 82 Grafica Componentes Principales Panel Monocristalino – Temperatura

5.1.3 Panel Monocristalino y Pluviometría

El siguiente análisis de componentes principales se hace con relación al panel monocristalino con los registros del día 26 de octubre, donde se tuvo condiciones de tiempo nublado con lluvias persistentes.

Observadores/Variables	Vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Vpm	Cpm
26/10/2016 5:58	0	0	9,39286	79,9	14,49	11,64	35,586
26/10/2016 6:58	0,22	0	36,1027	80,567	14,46	11,87	106,75
26/10/2016 7:59	0,04	0	126,878	76,373	15,52	12,13	311,08
26/10/2016 8:59	0,27	0	247,698	69,758	17,63	12,26	638,13
26/10/2016 9:58	0,3	0	286,013	65,429	18,6	12,21	677,98
26/10/2016 10:58	0,8	0	237,029	60,878	19,67	12,16	566,39
26/10/2016 11:58	1,03	0,18	67,8163	66,922	18,46	11,83	183,08
26/10/2016 12:58	0,24	0,01	133,811	75,642	17,85	11,89	391,37
26/10/2016 13:58	0,69	0	49,0136	74,376	17,36	11,68	149,37
26/10/2016 14:59	0,46	0,18	42,877	78,658	16,61	11,55	136,49
26/10/2016 15:58	0,35	0,08	36,5479	84,628	15,97	11,31	109,11
26/10/2016 16:58	0,09	0	44,2991	81,553	16,89	11,62	125,39
26/10/2016 17:35	0,18	0	24,722	77,975	16,92	11,77	69,545

Tabla 34 Datos de entrada PCA Panel Monocristalino – Pluviometría

En este análisis PCA se tomaron las variables ambientales de velocidad del viento, pluviometría, irradiancia, humedad y temperatura junto con las variables de salida del panel policristalino Vpm (Voltaje del panel monocristalino) y Cpm (Corriente Panel monocristalino).

Se ejecuta el siguiente código en Matlab donde la matriz de entrada, que corresponde a la Tabla 34, se encuentra en el archivo “datos3.dat”. Se estandariza la información contenida en la matriz dividiendo cada columna por su desviación estándar, de esta forma la información contenida en la matriz se hace adimensional y disminuye las grandes diferencias entre las varianzas de las variables.

```
load datos3.dat           %Se carga la matriz de entrada
stdr=std(datos3);         %Se halla la desviación estándar
stdr = 0.3070  0.0664  95.2660  7.0645  1.5603  0.2865  226.3359  %desviación
stdr              estándar

sr = datos3./repmat(stdr,13,1);           %Se normaliza la matriz de entrada
[pc,score,latent,tsquare] = princomp(sr);  %Se hallan los componentes
principales
```

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
VEL.VIEN.	0,1962	0,6185	-0,3285	0,2791	-0,5333	0,3262	0,0481
PLUVIOM.	-0,0863	0,6148	0,7559	-0,0031	0,2074	-0,012	0,0074
IRRADIAN.	0,4582	-0,1657	0,2688	-0,2474	-0,3342	-0,1295	0,7076
HUMEDAD.	-0,4558	-0,1667	0,1346	-0,355	-0,1525	0,7584	0,1477
TEMPERAT.	0,3973	0,2932	-0,3422	-0,5432	0,5456	0,2101	0,0476
VOL.P.MON.	0,4134	-0,2679	0,1784	0,5949	0,351	0,494	0,0661
COR.P.MON	0,4557	-0,1627	0,2854	-0,2931	-0,3417	0,1148	-0,6845

Tabla 35 Coeficientes Componentes Principales Panel Monocristalino – Pluviometría

Range = cumsum(latent)./sum(latent) %Se hallan los pesos de los componentes principales

Range = 0.6027 0.8778 0.9369 0.9796 0.9941 0.9996 1.0000

De acuerdo al valor de Range, que corresponde a la suma acumulativa del vector Latent (valores propios de la matriz de covarianza de los datos de entrada), podemos ver que los componentes principales que son más relevantes son los dos primeros, con los cuales se alcanza casi el 88% de la información.

En este caso, vemos que PC1 tiene la mayor correlación positiva con las variables de Irradiancia y potencia del panel monocristalino (voltaje y corriente), mientras que tiene mayor correlación negativa con la humedad. Por tanto, se aprecia que en condiciones de tiempo de lluvias la humedad sigue siendo un factor determinante que afecta la eficiencia de los paneles. En cuanto a PC2, se aprecia que tiene la mayor correlación positiva con las variables de velocidad del viento y la pluviometría, debido a que fue un día donde predominó la lluvia. Se procede a graficar la matriz “score” con los dos primeros componentes los cuales cuentan para el 87% de la varianza.

biplot(pc(:,1:2),'Scores',score(:,1:2),'VarLabels',{'vel' 'pluv' 'Irrad' 'hum' 'tem' 'vpm' 'cpm'})

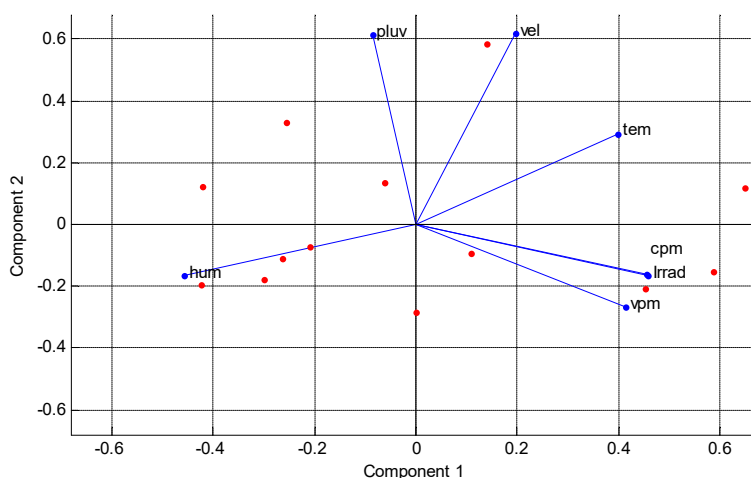


Figura 83 Grafica Componentes Principales Panel Monocristalino – Pluviometría

5.1.4 Panel Monocristalino y Humedad Relativa

El siguiente análisis de componentes principales se hace con relación al panel monocristalino con los registros del día 2 de noviembre, donde se tuvo condiciones de tiempo nublado, pero sin lluvias.

Fecha Bogotá	Vel	Pluvi	Irradian	Humed	Temp	Vpm	Cpm
02/11/2016 5:59	0,73	0	268,25	84,3	14,5	11,69	21,95
02/11/2016 6:59	0	0	271,296	83,889	14,43	11,88	73,6375
02/11/2016 7:59	0,05	0	356,655	79,415	15,45	12,15	237,468
02/11/2016 8:58	0	0	297,27	72,843	16,58	12,25	340,319
02/11/2016 9:59	0,18	0	546,355	62,513	18,85	12,47	895,003
02/11/2016 10:59	0,4	0	365,521	55,419	20,54	12,41	598,906
02/11/2016 11:58	0,98	0	564,558	52,872	21,36	12,52	745,135
02/11/2016 12:59	1,79	0	670,025	49,409	23,25	12,69	792,375
02/11/2016 13:59	1,74	0	441,878	46,359	24,23	12,58	621,83
02/11/2016 14:58	1,95	0	405,34	51,331	22,62	12,58	638,26
02/11/2016 15:59	1,59	0	313,945	48,83	23,44	12,51	502,202
02/11/2016 16:58	1,12	0	184,742	57,171	20,62	12,13	143,041
02/11/2016 17:29	1	0	186,912	62,84	18,67	11,98	56,6106

Tabla 36 Datos de entrada PCA Panel Monocristalino – Humedad

En este análisis PCA se tomaron las variables ambientales de velocidad del viento, pluviometría, irradiancia, humedad y temperatura junto con las variables de salida del panel policristalino Vpm (Voltaje del panel monocristalino) y Cpm (Corriente Panel monocristalino).

Se ejecuta el siguiente código en Matlab donde la matriz de entrada, que corresponde a la Tabla 36, se encuentra en el archivo “datos4.dat”. Se estandariza la información contenida en la matriz dividiendo cada columna por su desviación estándar, de esta forma la información contenida en la matriz se hace adimensional y disminuye las grandes diferencias entre las varianzas de las variables.

```
load datos4.dat           %Se carga la matriz de entrada
stdr=std(datos4);         %Se halla la desviación estándar
stdr = 0.7230    0 147.6620 13.6582  3.4657  0.3091  305.5990 %desviación
estándar
sr = datos4./repmat(stdr,13,1);           %Se normaliza la matriz de entrada
[pc,score,latent,tsquare] = princomp(sr);   %Se hallan los componentes
principales
```

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
VEL.VIEN.	0,3411	-0,5522	0,6503	0,2216	0,2922	-0,1465	0
PLUVIOM.	0	0	0	0	0	0	1
IRRADIAN.	0,3435	0,5656	0,5711	-0,2436	-0,4202	-0,0033	0
HUMEDAD.	-0,4403	0,2712	0,3412	0,5079	0,1698	0,5739	0
TEMPERAT.	0,4434	-0,3055	-0,1725	-0,1576	-0,198	0,785	0
VOL.P.MON.	0,4524	0,16	-0,2882	0,7717	-0,2526	-0,1654	0
COR.P.MON	0,4129	0,4275	-0,1475	-0,1151	0,7787	0,074	0

Tabla 37 Coeficientes Componentes Principales Panel Monocristalino – Humedad

Range = cumsum(latent)./sum(latent)%Se hallan los pesos de los componentes principales
Range = 0.7448 0.9367 0.9854 0.9936 0.9993 1.0000 1.0000

De acuerdo al valor de Range, que corresponde a la suma acumulativa del vector Latent (valores propios de la matriz de covarianza de los datos de entrada), podemos ver que los componentes principales que son más relevantes son los dos primeros, con los cuales se alcanza más del 93% de la información.

En este caso, vemos que PC1 tiene la mayor correlación positiva con las variables temperatura, potencia del panel monocristalino (voltaje y corriente) e irradiancia, mientras que tiene mayor correlación negativa con la humedad. Por tanto, se puede apreciar que en condiciones de tiempo nublado la humedad es un factor que afecta de manera significativa la eficiencia de los paneles. En cuanto a PC2, se aprecia que tiene la mayor correlación positiva con la irradiancia mientras que tiene mayor correlación negativa con la velocidad del viento. Se procede a graficar la matriz “score” para ver que los dos primeros componentes cuentan para el 93% de la varianza.

`biplot(pc(:,1:2),'Scores',score(:,1:2),'VarLabels',{'vel' 'pluv' 'Irrad' 'hum' 'tem' 'vpm' 'cpm'})`

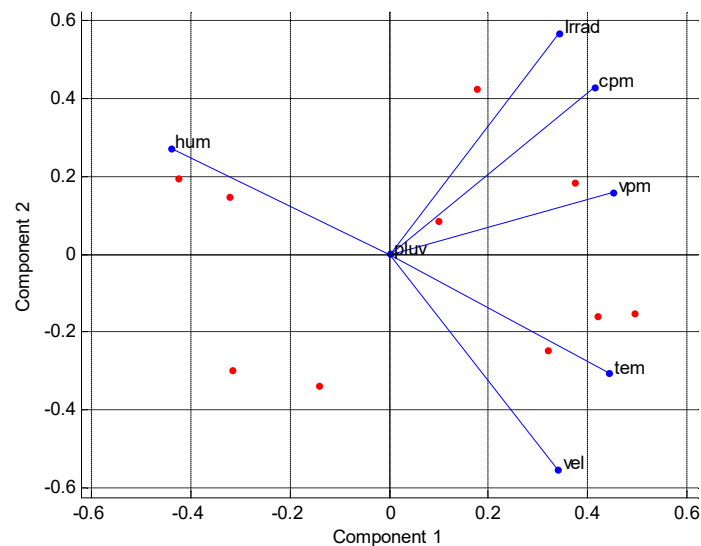


Figura 84 Grafica Componentes Principales Panel Monocristalino – Humedad

5.1.5 Panel Policristalino e Irradiancia

El siguiente análisis de componentes principales se hace con relación al panel policristalino con los registros del día 3 de noviembre, donde se tuvo condiciones de tiempo despejado y buenos niveles de Irradiancia.

Fecha Bogota	vel	Pluvi	Irradian	Humed	Temp	Vpp	Cpp
03/11/2016 5:59	0,37	0	260,18	78,33	14,41	12,08	21,745
03/11/2016 6:58	0,02	0	270,284	76,357	14,9	12,05	103,433
03/11/2016 7:58	0,14	0	322,515	72,439	15,89	12,32	314,368
03/11/2016 8:59	0,14	0	412,468	63,61	17,78	12,5	614,885
03/11/2016 9:59	0,35	0	527,964	57,343	19,86	12,83	1278,97
03/11/2016 10:58	0,75	0	765,375	46,519	23,54	14,52	2046,37
03/11/2016 11:59	0,91	0	698,837	39,717	25,41	15,46	1166,04
03/11/2016 12:58	0,63	0	428,548	38,617	25,74	14,23	730,224
03/11/2016 13:59	1,21	0	258,56	52,013	22,32	12,85	212,759
03/11/2016 14:58	1,19	0	234,687	61,616	18,95	12,72	25,173
03/11/2016 15:59	0,58	0	248,007	67,735	18,42	12,4	48,2547
03/11/2016 16:25	0,57	0	254,997	68,486	18,27	12,32	22,75

Tabla 38 Datos de entrada PCA Panel Policristalino – Irradiancia

En este análisis PCA se tomaron las variables ambientales de velocidad del viento, pluviometría, irradiancia, humedad y temperatura junto con las variables de salida del panel policristalino Vpp (Voltaje del panel policristalino) y Cpp (Corriente Panel policristalino). Se ejecuta el siguiente código en Matlab donde la matriz de entrada, que corresponde a la Tabla 38, se encuentra en el archivo “datos5.dat”. Se estandariza la información contenida en la matriz dividiendo cada columna por su desviación estándar, de esta forma la información contenida en la matriz se hace adimensional y disminuye las grandes diferencias entre las varianzas de las variables.

```
load datos5.dat           %Se carga la matriz de entrada
stdr=std(datos5);         %Se halla la desviación estándar
stdr = 0.3941    0 184.1038 13.5726 3.8626 1.1008 649.4479 %desviación
estándar

sr = datos5./repmat(stdr,13,1);           %Se normaliza la matriz de entrada
[pc,score,latent,tsquare] = princomp(sr);  %Se hallan los componentes
principales
```

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
VEL.VIEN.	0,2398	0,7237	0,644	0,0441	-0,0355	0,0275	0
PLUVIOM.	0	0	0	0	0	0	1
IRRADIAN.	0,4107	-0,4323	0,2786	0,2516	-0,1315	0,6973	0
HUMEDAD.	-0,4554	-0,1737	0,3805	0,3294	0,7132	0,0242	0
TEMPERAT.	0,4485	0,2335	-0,3844	-0,2818	0,6696	0,2622	0
VOL.P.POL.	0,459	-0,0043	-0,1936	0,7385	0,0694	-0,449	0
COR.P.POL	0,3932	-0,4524	0,4214	-0,4488	0,1401	-0,492	0

Tabla 39 Coeficientes Componentes Principales Panel Policristalino – Irradiancia

Range = cumsum(latent)./sum(latent)

Range = 0.7318 0.9370 0.9781 0.9978 0.9991 1.0000 1.0000

De acuerdo al valor de Range, que corresponde a la suma acumulativa del vector Latent (valores propios de la matriz de covarianza de los datos de entrada), podemos ver que los componentes principales que son más relevantes son los dos primeros, con los cuales se alcanza casi el 94% de la información.

En este caso, vemos que PC1 tiene la mayor correlación positiva con las variables de temperatura, potencia del panel policristalino (voltaje y corriente) e irradiancia, mientras que tiene mayor correlación negativa con la humedad. Por tanto, se puede apreciar que en condiciones de tiempo despejado la humedad es un factor que afecta determinantemente la eficiencia de los paneles. En cuanto a PC2, se aprecia que tiene la mayor correlación positiva con la velocidad del viento mientras que mayor correlación negativa con la irradiancia y potencia del panel. Se procede a graficar la matriz “score” para ver que los dos primeros componentes cuentan para el 93% de la varianza.

biplot(pc(:,1:2),'Scores',score(:,1:2),'VarLabels',{'vel' 'pluv' 'Irrad' 'hum' 'tem' 'vpp' 'cpp'})

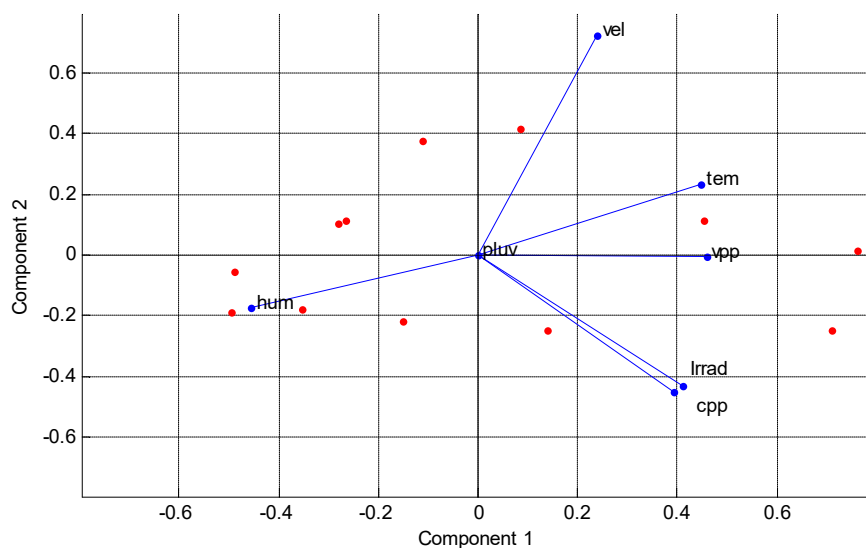


Figura 85 Grafica Componentes Principales Panel Policristalino – Irradiancia

5.1.6 Panel Policristalino y Temperatura

El siguiente análisis de componentes principales se hace con relación al panel policristalino con los registros del día 4 de noviembre donde se tuvo condiciones de tiempo despejado y temperaturas cálidas.

Fecha Bogotá	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Vp1	Cp1
04/11/2016 5:59	2,19	0	356,705	72,43	15,2	11,84	22,075
04/11/2016 6:58	0,87	0	365,05	70,963	15,56	12,08	121,395
04/11/2016 7:59	0,71	0	367,034	67,89	16,59	12,26	219,393
04/11/2016 8:58	1,18	0	539,986	62,635	18,35	12,67	1012,03
04/11/2016 9:58	1,67	0	524,308	58,283	19,04	12,76	930,649
04/11/2016 10:58	1,36	0	552,76	51,019	20,81	13,08	1100,55
04/11/2016 10:58	1,74	0	558,263	47,047	22,23	13,48	1049,44
04/11/2016 12:58	2,34	0	561,704	43,199	23,06	14,33	1191,94
04/11/2016 13:58	3,31	0	379,48	47,354	21,41	13,87	778,122
04/11/2016 14:59	2,8	0	226,115	51,993	19,79	12,97	430,212
04/11/2016 15:59	1,46	0	213,806	50,554	20	12,86	399,126
04/11/2016 16:58	1,67	0	155,592	53,134	19,18	12,66	224,28
04/11/2016 17:25	1,68	0	98,9285	58,532	17,51	12,51	48,7246

Tabla 40 Datos de entrada PCA Panel Policristalino – Temperatura

En este análisis PCA se tomaron las variables ambientales de velocidad del viento, pluviometría, irradiancia, humedad y temperatura junto con las variables de salida del panel policristalino Vpp (Voltaje del panel policristalino) y Cpp (Corriente Panel policristalino). Se ejecuta el siguiente código en Matlab donde la matriz de entrada, que corresponde a la Tabla 40, se encuentra en el archivo “datos6.dat”. Se estandariza la información contenida en la matriz dividiendo cada columna por su desviación estándar, de esta forma la información contenida en la matriz se hace adimensional y disminuye las grandes diferencias entre las varianzas de las variables.

```
load datos6.dat           %Se carga la matriz de entrada
stdr=std(datos6);         %Se halla la desviación estándar
stdr = 0.7369    0 163.9439  9.5068  2.4522  0.6979  440.6665  %desviación
estándar
sr = datos6./repmat(stdr,13,1);           %Se normaliza la matriz de entrada
[pc,score,latent,tsquare] = princomp(sr);   %Se hallan los componentes
principales
```

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
VEL.VIEN.	0,2651	-0,5428	0,7766	-0,1754	-0,0325	0,0073	0
PLUVIOM.	0	0	0	0	0	0	1
IRRADIAN.	0,2566	0,6786	0,4054	0,1662	-0,4939	-0,1945	0
HUMEDAD.	-0,4542	0,255	0,3941	0,2489	0,2591	0,6666	0
TEMPERAT.	0,4874	-0,0796	-0,27	-0,1086	-0,3967	0,717	0
VOL.P.POL.	0,4841	-0,1023	-0,0429	0,7901	0,3571	-0,0394	0
COR.P.POL	0,4309	0,4038	0,0498	-0,4935	0,6348	0,0472	0

Tabla 41 Coeficientes Componentes Principales Panel Policristalino - Temperatura

Range = cumsum(latent)./sum(latent)%Se hallan los pesos de los componentes

Range = 0.6652 0.8987 0.9828 0.9950 0.9997 1.0000 1.0000

De acuerdo al valor de Range, que corresponde a la suma acumulativa del vector Latent (valores propios de la matriz de covarianza de los datos de entrada), podemos ver que los componentes principales que son más relevantes son los dos primeros, con los cuales se alcanza casi el 90% de la información.

En este caso, vemos que PC1 tiene la mayor correlación positiva con las variables temperatura y potencia del panel policristalino (corriente y voltaje), mientras que tiene mayor correlación negativa con la humedad. Por tanto, se puede apreciar que en condiciones de tiempo despejado la humedad es un factor que afecta determinantemente la eficiencia de los paneles. En cuanto a PC2, se aprecia que tiene la mayor correlación positiva con la variable de irradiancia y la mayor correlación negativa con la velocidad del viento. Se procede a graficar la matriz “score” con los dos primeros componentes los cuales cuentan para el 89% de la varianza.

biplot(pc(:,1:2),'Scores',score(:,1:2),'VarLabels',{'vel' 'pluv' 'Irrad' 'hum' 'tem' 'vpp' 'cpp'})

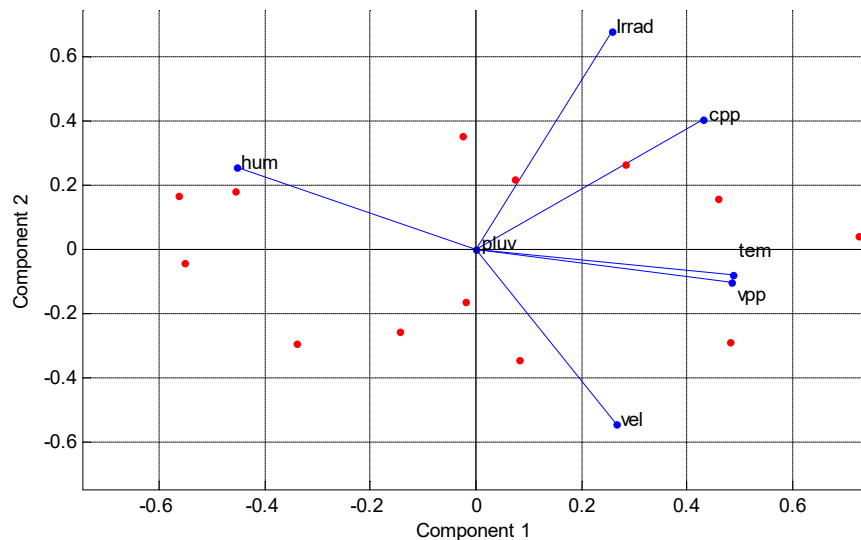


Figura 86 Grafica Componentes Principales Panel Policristalino -Temperatura

5.1.7 Panel Policristalino y Velocidad del Viento

El siguiente análisis de componentes principales se hace con relación al panel policristalino con los registros del día 5 de noviembre donde se tuvo condiciones de tiempo despejado con vientos persistentes.

Fecha Bogota	Vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Vp1	Cp1
05/11/2016 5:59	0	0	6,982	73,318	13,56	11,83	17,684
05/11/2016 6:59	0	0	29,5164	72,093	14,12	12,04	55,4848
05/11/2016 7:58	2,03	0	236,985	64,929	15,39	12,12	78,3881
05/11/2016 8:59	2,8	0	367,973	60,466	16,68	12,61	1026,89
05/11/2016 9:59	1,98	0	575,013	54,122	19,12	13,58	2035,03
05/11/2016 10:58	2,61	0	545,47	50,745	19,88	14,95	1180,28
05/11/2016 11:58	2,19	0	404,808	49,077	20,56	14,7	931,618
05/11/2016 12:59	1,97	0	355,436	47,016	21,13	15,15	822,676
05/11/2016 13:59	1,46	0	215,162	47,831	20,75	13,31	582,033
05/11/2016 14:58	1,58	0	358,333	45,99	21,71	14,94	686,007
05/11/2016 15:58	2,29	0	471,781	37,245	25,66	15,7	757,389
05/11/2016 16:58	1,86	0	162,459	38,12	24,8	12,95	251,462
05/11/2016 17:28	3,42	0	7,8925	54,591	17,47	12,61	23,7013

Tabla 42 Datos de entrada PCA Panel Policristalino - Velocidad del Viento

En este análisis PCA se tomaron las variables ambientales de velocidad del viento, pluviometría, irradiancia, humedad y temperatura junto con las variables de salida del panel policristalino Vpp (Voltaje del panel policristalino) y Cpp (Corriente Panel policristalino). Se ejecuta el siguiente código en Matlab donde la matriz de entrada, que corresponde a la Tabla 42, se encuentra en el archivo “datos7.dat”. Se estandariza la información contenida en la matriz dividiendo cada columna por su desviación estándar, de esta forma la información contenida en la matriz se hace adimensional y disminuye las grandes diferencias entre las varianzas de las variables.

```
load datos7.dat           %Se carga la matriz de entrada
stdr=std(datos7);         %Se halla la desviación estandar
stdr = 0.9734    0 195.7651 11.4662  3.7543  1.3499 584.4670 %desviación
estandar
sr = datos7./repmat(stdr,13,1); %Se normaliza la matriz de entrada
[pc,score,latent,tsquare] = princomp(sr); %Se hallan los componentes
principales
```

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
VEL.VIEN.	0,3058	-0,0211	0,9316	0,1431	-0,0479	0,1243	0
PLUVIOM.	0	0	0	0	0	0	1
IRRADIAN.	0,4322	0,4622	-0,087	0,0908	0,7495	-0,1484	0
HUMEDAD.	-0,4452	0,4387	0,0202	0,293	0,095	0,717	0
TEMPERAT.	0,434	-0,4455	-0,1802	-0,3359	0,1751	0,6612	0
VOL.P.POL.	0,453	-0,0626	-0,2931	0,7664	-0,3377	0,0594	0
COR.P.POL.	0,3577	0,6254	-0,0761	-0,4304	-0,5313	0,0879	0

Tabla 43 Coeficientes Componentes Principales Panel Policristalino -Viento

Range = cumsum(latent)./sum(latent) %Se hallan los pesos de los componentes
Range = 0.6372 0.8266 0.9489 0.9889 0.9993 1.0000 1.0000

De acuerdo al valor de Range, que corresponde a la suma acumulativa del vector Latent (valores propios de la matriz de covarianza de los datos de entrada), podemos ver que los componentes principales que son más relevantes son los dos primeros, con los cuales se alcanza casi el 83% de la información.

En este caso, vemos que PC1 tiene la mayor correlación positiva con las variables de temperatura y potencia del panel policristalino (corriente y voltaje), mientras que tiene mayor correlación negativa con la humedad. Por tanto, se puede apreciar que en condiciones de tiempo despejado con vientos continuos la humedad es un factor que afecta determinantemente la eficiencia de los paneles. En cuanto a PC2, se aprecia que tiene la mayor correlación positiva con la variable de corriente y la mayor correlación negativa con la temperatura. Se procede a graficar la matriz “score” para ver que los dos primeros componentes cuentan para el 82% de la varianza.

biplot(pc(:,1:2),'Scores',score(:,1:2),'VarLabels',{'vel' 'pluv' 'Irrad' 'hum' 'tem' 'vpp' 'cpp'})

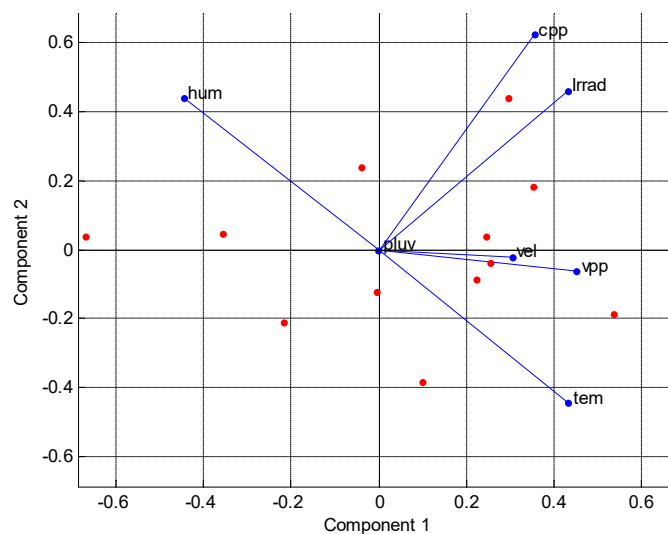


Figura 87 Grafica Componentes Principales Panel Policristalino -Viento

5.1.8 Panel Policristalino y pluviometría

El siguiente análisis de componentes principales se hace con relación al panel policristalino con los registros del día 7 de noviembre donde se presentaron lluvias intensas.

Fecha Bogotá	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Vp1	Cp1
07/11/2016 5:59	0	0	6,83846	73,291	14,02	11,84	19,9777
07/11/2016 6:58	0	0	52,9881	71,209	14,57	12,12	121,11
07/11/2016 7:58	0,21	0	210,676	64,661	16,79	12,24	155,437
07/11/2016 8:58	0,41	0	298,966	58,506	18,76	12,64	948,722
07/11/2016 9:58	0,89	0	332,504	52,125	20,49	12,92	1035,36
07/11/2016 10:59	0,8	0	296,809	44,591	22,67	12,97	901,198
07/11/2016 11:58	0,16	0	95,0961	50,586	21,09	12,45	248,742
07/11/2016 12:58	1,18	0,21	61,7755	75,348	17,85	12,35	193,062
07/11/2016 13:58	1,27	0	368,591	74,015	18,99	13,14	1154,08
07/11/2016 14:59	0,84	0,01	93,945	62,966	20,24	12,6	247,547
07/11/2016 15:58	0,41	0,04	15,8785	75,241	16,98	12,32	62,907
07/11/2016 16:59	0	0	28,1507	73,647	16,43	12,21	87,7897
07/11/2016 17:13	0	0	5,21	74,251	16,33	12,12	24,6857

Tabla 44 Datos de entrada PCA Panel Policristalino – Pluviometría

En este análisis PCA se tomaron las variables ambientales de velocidad del viento, pluviometría, irradiancia, humedad y temperatura junto con las variables de salida del panel policristalino Vpp (Voltaje del panel policristalino) y Cpp (Corriente Panel policristalino). Se ejecuta el siguiente código en Matlab donde la matriz de entrada, la cual corresponde a la Tabla 44, se encuentra en el archivo “datos8.dat”. Se estandariza la información contenida en la matriz dividiendo cada columna por su desviación estándar, de esta forma la información contenida en la matriz se hace adimensional y disminuye las grandes diferencias entre las varianzas de las variables.

```
load datos8.dat           %Se carga la matriz de entrada
stdr=std(datos8);         %Se halla la desviación estándar
stdr =    0.4680    0.0575   137.1245   10.7824    2.5732    0.3811   432.7745
           %desviación estándar
sr = datos8./repmat(stdr,13,1);           %Se normaliza la matriz de entrada

[pc,score,latent,tsquare] = princomp(sr);   %Se hallan los componentes
principales
```

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
<i>VEL.VIEN.</i>	0,344	0,5355	0,0656	-0,2743	0,5777	-0,4149	-0,0973
<i>PLUVIOM.</i>	-0,0632	0,7474	-0,3307	0,4726	-0,2558	0,1661	0,1081
<i>IRRADIAN.</i>	0,4348	-0,071	0,3536	0,4444	0,3699	0,5753	-0,1248
<i>HUMEDAD.</i>	-0,3317	0,3769	0,5834	-0,399	-0,2248	0,3257	-0,3029
<i>TEMPERAT.</i>	0,4119	-0,0255	-0,5291	-0,3757	-0,1996	0,3169	-0,518
<i>VOL.P.POL.</i>	0,4617	0,0808	0,1244	-0,3606	-0,2731	0,1955	0,7225
<i>COR.P.POL.</i>	0,4424	-0,0178	0,3543	0,271	-0,5469	-0,4739	-0,285

Tabla 45 Coeficientes Componentes Principales Panel Policristalino - Pluviometría

Range = cumsum(latent)./sum(latent)

Range = 0.6281 0.8436 0.9514 0.9848 0.9932 0.9986 1.0000

De acuerdo al valor de Range, que corresponde a la suma acumulativa del vector Latent (valores propios de la matriz de covarianza de los datos de entrada), podemos ver que los componentes principales que son más relevantes son los dos primeros, con los cuales se alcanza casi el 100% de la información.

En este caso, vemos que PC1 tiene la mayor correlación positiva con las variables de Irradiancia, temperatura y potencia del panel policristalino (corriente y voltaje), mientras que tiene mayor correlación negativa con la humedad. Por tanto, se puede apreciar que en condiciones de tiempo con lluvias la humedad es un factor que afecta determinantemente la eficiencia de los paneles. En cuanto a PC2, se aprecia que tiene la mayor correlación positiva con la variable de pluviometría, se puede deducir que a pesar que en este día hubo lluvias intensas, la lluvia solo es determinante en el segundo componente principal debido a que las lluvias solo se dan en unas pocas horas del día. Se procede a graficar la matriz “score” para ver que los dos primeros componentes cuentan para el 84% de la varianza.

biplot(pc(:,1:2),'Scores',score(:,1:2),'VarLabels',{'vel' 'pluv' 'Irrad' 'hum' 'tem' 'vpp' 'cpp'})

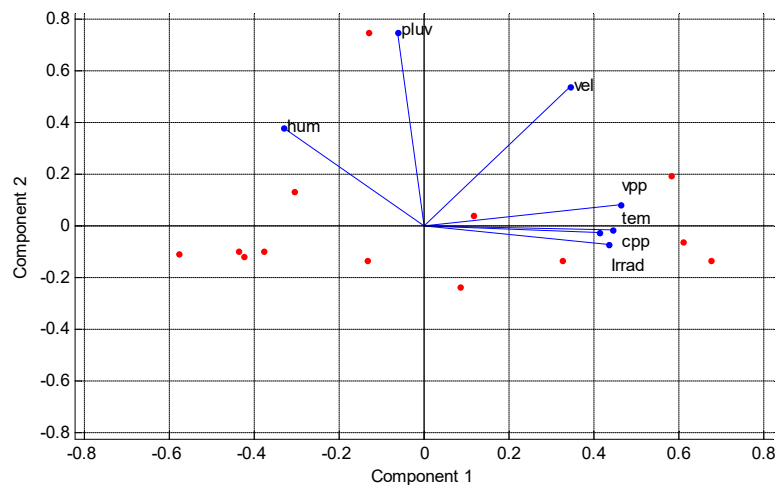


Figura 88 Grafica Componentes Principales Panel Policristalino – Pluviometría

5.1.9 Panel Policristalino y Humedad relativa

El siguiente análisis de componentes principales se hace con relación al panel policristalino con los registros del día 9 de noviembre donde se tuvo condiciones de tiempo nublado, pero sin lluvias.

Fecha Bogotá	vel	Pluvi	Irradian	humed	Temp	Vp1	Cp1
09/11/2016 5:59	0	0	1,70667	88,4	13,6	11,91	15,045
09/11/2016 6:58	0,11	0	17,1844	84,918	14,11	12,08	42,4122
09/11/2016 7:58	0,15	0	213,018	75,287	16,2	12,23	124,883
09/11/2016 8:58	0,44	0	316,928	67,137	18,23	12,58	784,566
09/11/2016 9:59	1,19	0	547,158	53,725	21,21	13,7	1793,01
09/11/2016 10:58	1,48	0	315,34	50,799	21,84	13,39	799,76
09/11/2016 11:59	1,04	0	309,846	47,779	22,63	13,8	813,731
09/11/2016 12:59	1,5	0	376,963	44,248	23,42	14,32	828,743
09/11/2016 13:58	0,64	0	381,204	41,164	26,49	14,34	649,548
09/11/2016 14:58	1,14	0	80,9747	57,691	21,84	12,59	209,979
09/11/2016 15:58	1,07	0	199,521	60,609	22,63	12,81	506,575
09/11/2016 16:59	1,04	0	143,175	59,693	22,98	12,59	290,375
09/11/2016 17:35	0,73	0	9,3575	70,77	19,22	12,37	28,9325

Tabla 46 Datos de entrada PCA Panel Policristalino - Humedad Relativa

En este análisis PCA se tomaron las variables ambientales de velocidad del viento, pluviometría, irradiancia, humedad y temperatura junto con las variables de salida del panel policristalino Vpp (Voltaje del panel policristalino) y Cpp (Corriente Panel policristalino). Se ejecuta el siguiente código en Matlab donde la matriz de entrada, que corresponde a la Tabla 46, se encuentra en el archivo “datos9.dat”. Se estandariza la información contenida en la matriz dividiendo cada columna por su desviación estándar, de esta forma la información contenida en la matriz se hace adimensional y disminuye las grandes diferencias entre las varianzas de las variables.

```
load datos9.dat           %Se carga la matriz de entrada
stdr=std(datos9);         %Se halla la desviación estándar
stdr = 0.5086    0 169.0309 14.9225  3.8417  0.8350  499.6077 %desviación
estándar
sr = datos8./repmat(stdr,13,1); %Se normaliza la matriz de entrada
[pc,score,latent,tsquare] = princomp(sr); %Se hallan los componentes
principales
```

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
VEL.VIEN.	0,3793	-0,3643	0,7705	0,245	0,1916	0,1817	0
PLUVIOM.	0	0	0	0	0	0	1
IRRADIAN.	0,4008	0,517	-0,1232	-0,1908	0,6659	0,2776	0
HUMEDAD.	-0,4474	0,2449	0,1893	0,029	-0,2154	0,8104	0
TEMPERAT.	0,4056	-0,4513	-0,2408	-0,6068	-0,2655	0,3677	0
VOL.P.POL.	0,4352	0,0126	-0,4294	0,7097	-0,2499	0,2449	0
COR.P.POL	0,3762	0,5798	0,336	-0,1759	-0,5835	-0,1949	0

Tabla 47 Coeficientes Componentes Principales Panel Policristalino - Humedad Relativa

Range = cumsum(latent)./sum(latent) %Se hallan los pesos de los componentes principales

Range = 0.7717 0.9138 0.9735 0.9913 0.9982 1.0000 1.0000

De acuerdo al valor de Range, que corresponde a la suma acumulativa del vector Latent (valores propios de la matriz de covarianza de los datos de entrada), podemos ver que los componentes principales que son más relevantes son los dos primeros, con los cuales se alcanza casi el 92% de la información como se ve en el segundo valor del vector Range.

En este caso, donde predomina los altos niveles de humedad, vemos que PC1 tiene la mayor correlación positiva con la Irradiancia, mientras que tiene mayor correlación negativa con la humedad. En cuanto a PC2, se aprecia que tiene la mayor correlación positiva con las variables de Irradiancia y temperatura, se puede deducir que la mayor parte del día la irradiancia y temperatura fueron bajas. Se procede a graficar la matriz “score” para ver que los dos primeros componentes cuentan para el 91% de la varianza.

biplot(pc(:,1:2),'Scores',score(:,1:2),'VarLabels',{'vel' 'pluv' 'Irrad' 'hum' 'tem' 'vpp' 'cpp'})

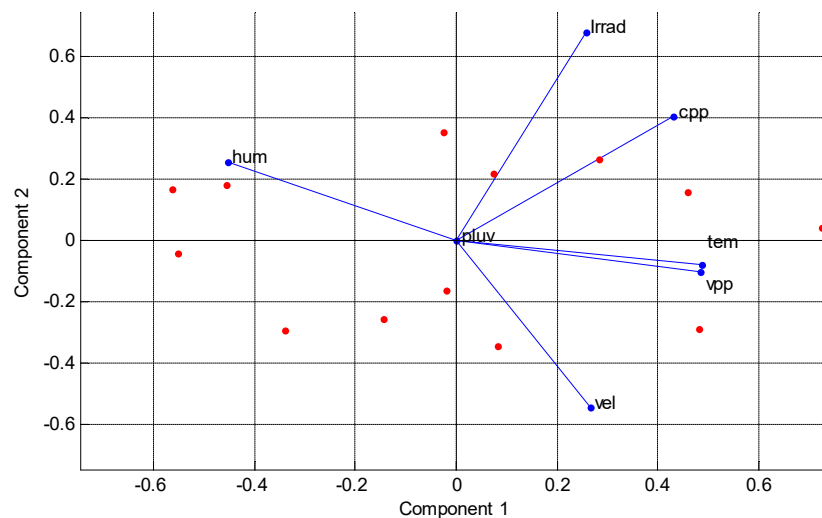


Figura 89 Grafica Componentes Principales Panel Policristalino - Humedad Relativa

5.2 Eficiencia de paneles Monocristalino y Policristalino de acuerdo a Irradiancia

Una vez se ha realizado el análisis de componentes principales de los paneles solares y las variables climáticas en condiciones de tiempo variables y después de apreciar la relevancia que tienen dichas variables sobre la potencia generada por los paneles, se procede a realizar un estimativo de la eficiencia de los dos tipos de paneles de acuerdo a la Irradiancia incidente. Debido a que la irradiancia está dada en función del área de los paneles solares (W/m^2), lo primero que se debe establecer es la relación de Irradiancia de acuerdo al área de los paneles usados para este estudio.

Para el caso del panel monocristalino se determina su área total según sus especificaciones técnicas de acuerdo a sus dimensiones:

$$0,630\text{m} \times 0,541\text{m} = 0,34083 \text{ m}^2$$

Como la magnitud de la Irradiancia medida por el sensor está dada para un área de 1m^2 , se saca la relación k con el área del panel:

$$k = \frac{1\text{m}^2}{0,34083 \text{ m}^2} = 2,934$$

De acuerdo a las especificaciones técnicas del panel monocristalino la eficiencia es de 14.67% y la potencia máxima de salida de 50W en STC (Condiciones de Pruebas Estándar). Los 50W están dados con una Irradiancia de entrada de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, por lo tanto, podemos comprobar el valor de la constante k hallando el valor de la eficiencia con los valores máximos dados.

$$\eta = \frac{P_{\text{out}} * 100}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{max}} * k * 100}{P_{\text{in}}} = \frac{50\text{W} * 2,934 * 100}{1000\text{W}/\text{m}^2} = \frac{14670}{1000} = 14,67\%$$

Se comprueba que la eficiencia hallada incluyendo la constante k es igual a la de las especificaciones técnicas del panel, de esta manera se puede calcular la eficiencia en condiciones normales de la irradiancia.

De la misma manera para el caso del panel policristalino se determina su área total según sus especificaciones técnicas de acuerdo a sus dimensiones:

$$0,550\text{m} \times 0,680\text{m} = 0,374 \text{ m}^2$$

Como la magnitud de la Irradiancia medida por el sensor está dada para un área de 1m^2 , se saca la relación k con el área del panel:

$$k = \frac{1\text{m}^2}{0,374 \text{ m}^2} = 2,673$$

De acuerdo a las especificaciones técnicas del panel policristalino la eficiencia es de 13.37% y la potencia máxima de salida de 50W en STC (Condiciones de Pruebas Estándar). Los 50W

están dados con una Irradiancia de entrada de 1000 W/m², por lo tanto, podemos comprobar el valor de la constante k hallando el valor de la eficiencia con los valores máximos dados.

$$\eta = \frac{P_{out} * 100}{P_{in}} = \frac{P_{max} * k * 100}{P_{in}} = \frac{50W * 2,673 * 100}{1000W/m^2} = \frac{13365}{1000} = 13,365\%$$

Se comprueba que la eficiencia hallada incluyendo la constante k es igual a la de las especificaciones técnicas del panel, de esta manera se puede calcular la eficiencia en condiciones normales de la irradiancia.

Una vez se determinan los factores para hallar la eficiencia de los paneles, se retoman los registros tomados por la estación meteorológica y se calcula la eficiencia, tanto en el panel monocristalino como en el panel policristalino.

En la Tabla 48 se muestran registros del día 29 de octubre donde las condiciones del tiempo fueron variables y a partir de la Irradiancia y potencia se halló la eficiencia para cada panel. PPM corresponde a la Potencia del Panel Monocristalino en Vatios, PPP corresponde a Potencia del Panel Policristalino en Vatios, EPM corresponde a la Eficiencia del Panel Monocristalino en Porcentaje y EPP corresponde a Eficiencia del Panel Policristalino en Porcentaje. En la tabla solo aparece un registro por hora sin embargo el muestreo fue hecho cada 2 minutos.

FECHA	IRRADIANCIA	PPM	PPP	EPM	EPP
29/10/2016 6:10	10,52	0,40527	0,42632	11,3028724	10,835093
29/10/2016 7:11	31,56	1,028718	1,052265	9,56355707	8,91457836
29/10/2016 8:11	128,87	3,994595	4,196216	9,09454623	8,7060004
29/10/2016 9:11	186,73	5,45218	5,5332	8,56675206	7,92273167
29/10/2016 10:10	176,21	5,106738	5,1132	8,50301872	7,75844892
29/10/2016 11:13	260,37	9,174466	8,079012	10,3383198	8,29621477
29/10/2016 12:10	315,6	10,849384	9,463483	10,0862144	8,01727329
29/10/2016 13:10	123,61	3,676632	3,7692	8,72683301	8,15282747
29/10/2016 14:11	405,02	12,35	11,435202	8,94644709	7,54883699
29/10/2016 15:10	49,97	2,043343	1,969704	11,9975352	10,5391186
29/10/2016 16:10	71,01	2,28085	2,44053	9,42404436	9,18919175

Tabla 48 Valores de eficiencia de paneles solares de acuerdo a Irradiancia

En la Figura 90 se grafica la eficiencia de los paneles de acuerdo a la Irradiancia de entrada. Esta grafica está hecha a partir de la Tabla 48 y como se mencionó anteriormente las muestras fueron tomadas cada 2 minutos, sino que por efectos de tamaño en la tabla solo se muestra un registro por hora. En la parte izquierda de la gráfica se tiene la escala porcentual de la eficiencia, mientras que en la parte derecha se tiene la escala en W/m² de la Irradiancia. EfPm corresponde a la Eficiencia del Panel Monocristalino y EfPp corresponde a Eficiencia de Panel Policristalino.

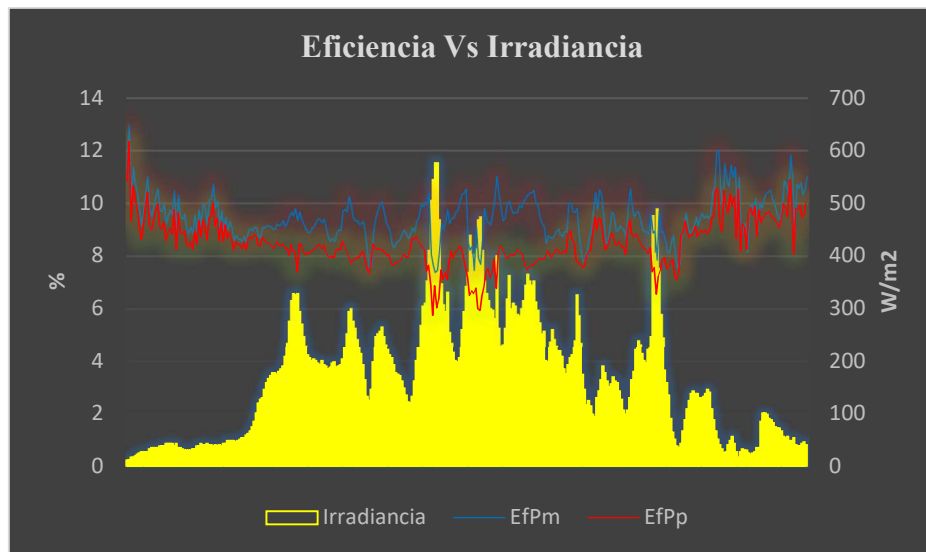


Figura 90 Eficiencia de paneles de acuerdo a Irradiancia

Se hayan los componentes principales para ver el impacto de las variables ambientales en la eficiencia.

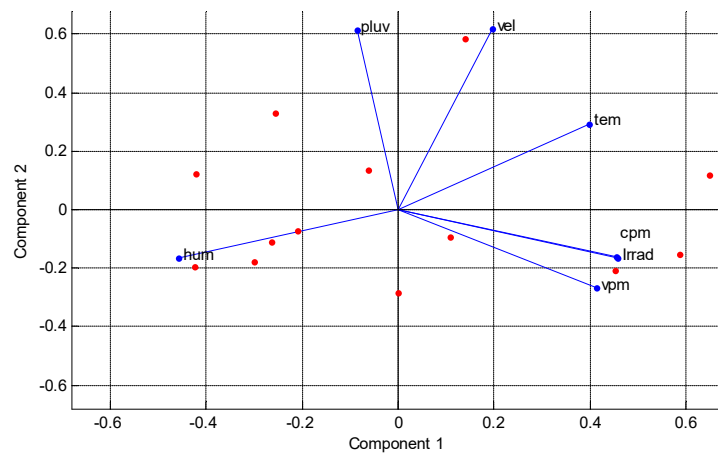


Figura 91 Componentes principales correlacionados con la eficiencia

A partir de los registros de la eficiencia tomados cada dos minutos se halla el valor medio tanto para el panel monocristalino como para el policristalino. El valor medio de la eficiencia para el panel monocristalino fue de 9,45% mientras que para el panel policristalino fue del 8,48%. Como se esperaba la eficiencia del panel policristalino fue menor, sin embargo, la media de la eficiencia de los dos paneles fue significativamente menor a la dada por el fabricante. Adicional a la estimación de la eficiencia de los paneles fotovoltaicos a partir de la Irradiancia, en la Figura 91 se puede apreciar que las variables que más afectan positivamente la eficiencia en el primer componente es la irradiancia y la temperatura, mientras que la que más impacta negativamente es la humedad. En el segundo componente se puede apreciar que la variable que más impacta sobre la eficiencia es la pluviometría.

6. Conclusiones

- Como principal conclusión del presente trabajo queda la implementación de una estación meteorológica y de medición de potencia, que registra las variables climáticas de temperatura, humedad, velocidad del viento, irradiación del sol y pluviometría además de corriente y voltaje generado por los paneles solares fotovoltaicos de tipo monocristalino y policristalino.
- A través del desarrollo de este proyecto se logra obtener una base de datos que correlaciona las variables ambientales y los niveles de potencia generada por los paneles solares fotovoltaicos del tipo monocristalino y policristalino en la ciudad de Bogotá.
- Con la implementación del presente trabajo se logró validar la metodología para determinar el impacto de los factores ambientales en la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos del tipo monocristalino y policristalino en la ciudad de Bogotá.
- Se comprueba que la eficiencia de los paneles solares de la tecnología fotovoltaica, tanto del tipo monocristalino como del tipo policristalino, no solamente depende de sus especificaciones de fabricación, sino que también se ve afectada por las condiciones ambientales que son determinantes en la magnitud de la irradiancia incidente.
- La ciudad de Bogotá es un lugar ideal para estudiar el impacto de las variables climáticas sobre la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos, esto debido a que se puede encontrar fácilmente variaciones de las todas las variables climáticas en corto tiempo. En el periodo de registro y observación, que fue de un mes, se tuvo tanto condiciones de tiempo despejado y seco que favorecía los niveles de Irradiancia y temperatura, así como condiciones de tiempo húmedo donde se presentaron fuertes lluvias, altos niveles de humedad y temperaturas bajas.
- Después de registrar las variables climáticas y la potencia generada por los paneles fotovoltaicos, se graficó la relación de las variables climáticas, primero con la irradiancia y luego con la potencia generada por los paneles fotovoltaicos, para intentar determinar cuáles variables climáticas tenían mayor impacto sobre la eficiencia, sin embargo, no se logró ver de una manera contundente la relevancia de cada una de las variables sobre la potencia generada por lo cual se hizo más importante el uso de una herramienta como el PCA para el análisis de datos obtenidos.
- A partir del estudio hecho con análisis de componentes principales se logró ver la relevancia de cada variable climática sobre la generación de potencia en los paneles solares fotovoltaicos tanto en el de tipo monocristalino como en el de tipo policristalino. Aunque los casos de análisis de componentes principales fueron hechos en condiciones de tiempo marcadas por la predominancia de algunas variables, el resultado fue parecido en la mayoría de los casos.

- Las variables que tuvieron mayor correlación positiva con la potencia generada por los paneles fotovoltaicas en la ciudad de Bogotá fueron la temperatura y la irradiancia, mientras que la que tuvo mayor correlación negativa fue la humedad. Aunque la lluvia también dio una correlación negativa con la generación de potencia, no fue tan determinante como la humedad debido a que la lluvia no se presenta la mayor parte del día sino de manera no continua. Las demás variables no tienen una correlación notoria en la mayoría de los casos.
- La eficiencia en condiciones reales de instalación, las cuales difieren con las condiciones en las que se definen las especificaciones de los paneles, se reduce significativamente con las variaciones climáticas como las de la ciudad de Bogotá. Aunque se comprueba que la tecnología fotovoltaica de tipo monocristalino es más eficiente se aprecia que esta alrededor del 4% por debajo de la especificación del fabricante. El mismo caso sucede con la eficiencia de la tecnología fotovoltaica del tipo policristalino, la cual disminuye en misma proporción.
- Como trabajo futuro propuesto sería importante realizar el mismo procedimiento de estudio con datos recolectados, tanto de las variables climáticas como de la potencia generada por los paneles solares, durante mínimo un año.
- Debido a que la plataforma de la estación meteorológica Owasys Owa33 cuenta con un modem celular, se propone como trabajo a futuro que la información recopilada por la estación se envíe por modem celular hacia una plataforma web donde se pueda ver la información remota en línea y poder generar análisis de la información con herramientas estadísticas.
- Se recomienda el uso futuro de otras técnicas de predicción y análisis estadísticos de la información recopilada por la estación meteorológica e interfaz de medición de potencia

7. Referencias

- Ajdid, R., Ouassaid, M., & Maaroufi, M. (2015). Power output evaluation of polycrystalline PV panel under various irradiances and temperatures in Moroccan regions. *Electrical and Information Technologies (ICEIT), 2015 International Conference on*, 257 - 262.
- Ballabio, D. (2015). A MATLAB toolbox for Principal Component Analysis and unsupervised exploration of data structure. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1-9.
- Baojie Yan, G. Y. (2012). High efficiency amorphous and nanocrystalline silicon thin film solar cells on flexible. *United Solar Ovonic LLC*, 67 - 70.
- Campbell, J., Zemen, Y., Richardson, B., & Striner, B. (2012). Photovoltaic module performance and degradation as compared in distinct climatic regions. *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE*, 1250 - 1255.
- Chamaria, P., & Dube, A. (2014). Consequences of Dust on Solar Photovoltaic Module and Its Generation. *Power Electronics (IICPE), 2014 IEEE 6th India International Conference on*, 1 - 5.
- Cristian, H., & Raducu, M. (2014). Energy efficiency analysis of various topologies, control techniques and technologies used for photovoltaic panels Part I: On the PV modeling and problem of extracting the maximum power. *Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 2014 6th International Conference on*, 23 - 28.
- Davis, I. (2010). *Solar Radiation Sensor 6450*. Hayward, CA: Davis Instruments.
- Davis, I. (2013). *Rain Collector 7852*. Hayward, CA: Davis Instruments.
- dos Santos, P., & Vicente, E. (2011). Relationship between the shading position and the output power of a photovoltaic panel. *Power Electronics Conference (COBEP), 2011 Brazilian*, 676 - 681.
- Dustegor, D., & Felemban, N. (2013). Wireless sensor network based monitoring system for photovoltaic panels in extreme GCC climate conditions: A literature review of current approaches. *IEEE Conference Publications*, 326 - 329.
- Eraso Checa, F., Erazo de la Cruz, O., & Escobar Rosero, E. (2015). Study of the relationship between irradiance and power generated by PV panels based on different silicon technologies in the city of Pasto. *Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), 2015 IEEE Workshop on*, 1 - 6.
- Gordon, I., & Van Gestel, D. (2008). Processing and Characterization of Efficient Thin-Film Polycrystalline Silicon Solar Cells. *978-1-4244-1641 IEEE*.
- Guha, S. (2003). Roll-to-roll production of amorphous silicon based triple junction solar cells. *Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on*, 1533 - 1537.
- Heckenbergerova, J., Janata, M., Musilek, P., & Wang, J. (2015). Analysis of wind ramp events using their conditional probabilities from PCA 3D tables. *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*, 158 - 162.
- Heckenbergerova, J., Musilek, P., Marek, J., & Rodway, J. (2014). Principal Component Analysis for Evaluation of Wind Ramp Event Probability. *2014 IEEE Electrical Power and Energy Conference*, 208-212.

- Hudy, W., Kazimierz, J., & Krzysztof, P. (2015). An influence of selected anthropogenic and climatic conditions on the production of energy in photovoltaic panels. *Carpathian Control Conference (ICCC), 2015 16th International*, 181 - 185.
- IEEE 1159, S. (2009). IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Standards*, c1 - 81.
- Jana Heckenbergerova, M. J. (2015). Analysis of Wind Ramp Events Using Their Conditional Probabilities from PCA 3D Tables. *IEEE Conference Publications*, 158 - 162.
- Jordehi, A. R. (2016). Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 354-371.
- L.Rajaji, D. (2014). Design of Energy Efficient Low Cost Solar. *2014 Annual IEEE India Conference (INDICON)*. Chennai, Tamil Nadu, India: IEEE.
- Lewlomphaisarl, U., & Saengsatcha, P. (2012). High accuracy tipping bucket rain gauge. *2012 Proceedings of SICE Annual Conference (SICE)*, 372 - 375.
- Lihua, W., & Dawei, Y. (2014). Study of anemometer for wind power generation. *2014 International Conference on Mechatronics and Control (ICMC)*, 657 - 661.
- Maghami, M., Hizam, H., & Gomes, C. (2014). Impact of dust on solar energy generation based on actual performance. *Power and Energy (PECon), 2014 IEEE International Conference on*, 388 - 393.
- Malta, A., Bicalho, S., Carlette, L., Moreira, R., Rodrigues, D., & Pereira, H. (2013). Development of a thermal visor to analyze the influence on temperature in the efficiency of a solar panel. *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2013 IEEE PES Conference On*. 1 - 5.
- Mariam, W., & Husni, S. (2006). Influence of Malaysian Climate on the Efficiency of Polycrystalline Solar Cells. *Power and Energy Conference, 2006. PECon '06. IEEE International*, 54 - 57.
- Mark Nixon, A. S. (2012). Feature Extraction & Image Processing for Computer Vision.
- Matos, F., & Camacho, J. (2007). A model for semiconductor photovoltaic (PV) solar cells: the physics of the energy conversion, from the solar spectrum to dc electric power. *IEEE Conference Publications*, 352 - 359.
- Melis, W. J., & Mallick, S. K. (2014). Increasing Solar Panel Efficiency in a Sustainable Manner. *School of Engineering, University of Greenwich*.
- Owasys, ©. (2011). *Owa3X Platform Integrator's Manual*.
- Prudhvi, P., & Chaitanya Sai, P. (2012). Efficiency improvement of solar PV panels using active cooling. *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference*, 1093 - 1097.
- Sandhya, S., Starbell, R., & Wessley, G. (2015). Study on performance enhancement of PV cells by water spray cooling for the climatic conditions of Coimbatore, Tamilnadu. *Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), 2015 International Conference on*, (págs. 1 - 5).
- Sheikh, N., & Kocaoglu, D. F. (Year: 2011). A comprehensive assessment of solar photovoltaic technologies: Literature review. *IEEE Conference Publications*, 1 - 11.
- Touati, F., Al-Hitmi, M., & Bouchech, H. (2012). Towards understanding the effects of climatic and environmental factors on solar PV performance in arid desert regions

- (Qatar) for various PV technologies. *Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET), 2012 First International Conference on*, 78 - 83.
- Virtuani, A., Skoczek, A., & Strepparava, D. (2015). Modeling the performance of amorphous silicon photovoltaic modules for different geographical locations in North-America. *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd*, 1 - 6.
- Wolf, M. (1980). Photovoltaics II: Flat panels: Fixed-base silicon arrays are expected to exploit efficient, lightly doped cells. *Spectrum, IEEE*.