



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN  
CON LA COLECTIVIDAD**

**MAESTRIA EN ENERGÍAS RENOVABLES PROMOCIÓN II**

**TESIS DE GRADO MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**TEMA: “ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTACIÓN  
FOTOVOLTAICA CON UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE  
PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y AMBIENTALES EN LA ESPE”**

**AUTORES: VILLACIS FRANCO JORGE DAVID  
NETO LOJA EDISON PATRICIO**

**TUTOR: ING. JOSÉ GUASUMBA**

**SANGOLQUÍ, MARZO DEL 2015**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE  
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN CON LA  
COLECTIVIDAD

CERTIFICADO ELABORACIÓN DE PROYECTO

El proyecto “ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA CON UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y AMBIENTALES EN LA ESPE” fue realizado en su totalidad por los alumnos JORGE DAVID VILLACIS FRANCO y EDISON NETO, como requerimiento parcial para la obtención del título de MÁSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES.

-----

Ing. Alexander Ibarra.

COORDINADOR DE LA MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE  
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN CON LA  
COLECTIVIDAD

MAESTRIA EN ENERGÍAS RENOVABLES PROMOCIÓN II

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Villacis Franco Jorge David

Neto Loja Edison Patricio

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado “ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA CON UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y AMBIENTALES EN LA ESPE” ha sido desarrollado en base a una investigación, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Septiembre del 2014.

Jorge David Villacis Franco

Edison Patricio Neto Loja

## **AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

Nosotros Jorge David Villacis Franco y Edison Patricio Neto Loja autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS para que publique en la biblioteca virtual el proyecto titulado: “ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA CON UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y AMBIENTALES EN LA ESPE”

-----  
Ing. Jorge David Villacis Franco.

-----  
Ing. Edison Patricio Neto Loja.

## DEDICATORIA

*Edison Neto:*

*Dedico mi proyecto de tesis con infinito amor a mis hijos, a mi madre, a mi esposa, a mi hermano a mi abuelita.*

*Jorge David Villacis Franco:*

*Este esfuerzo lo dedico a mi esposa Luisa Miranda a mis padres Jorge Aníbal Villacis Narváez y Leonor María Franco Basilio y mis queridos hermanos Peter, Yesenia y Darío.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A tod@s las personas que de una u otra forman colaboraron.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO ELABORACIÓN DE PROYECTO .....	I
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD .....	II
AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN .....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTOS .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
RESUMEN .....	X
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
GENERALIDADES .....	1
1.1 Justificación técnica, social, económica y ambiental .....	1
1.2 Antecedentes .....	4
1.3 Objetivos .....	9
1.3.1 Objetivo general .....	9
1.3.2 Objetivos específicos .....	9
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
MARCO TEÓRICO .....	10
2.1 Generalidades sobre la energía solar .....	10
2.2 Dimensionamiento de instalaciones fotovoltaicas .....	18
2.3 Efecto fotovoltaico .....	21
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>25</b>
METODOLOGÍA .....	25
3.1. Máxima energía generada en condiciones estándar .....	25
3.2. Máxima energía generada en condiciones reales. ....	26
3.3. Energía realmente generada por una instalación .....	31
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>33</b>
MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ESTANDARIZACIÓN DEL EQUIPO .....	33
4.1 Equipos empleados para el moldeamiento .....	33
4.2 Procesamiento de datos. ....	39

CAPÍTULO 5.....	59
FUNCIONAMIENTO Y COSTOS DEL EQUIPO.....	59
5.1  COSTOS DE EQUIPOS Y MATERIALES PARA LA INVESTIGACIÓN.....	59
5.2  COSTOS DEL PERSONAL DE INVESTIGACIÓN.....	59
5.3  MISCELÁNEOS.....	59
5.4  RESUMEN DE COSTOS.....	60
CAPÍTULO 6.....	61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
6.1  Conclusiones.....	61
6.2  Recomendaciones.....	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
ANEXOS.....	65
ANEXO 1.....	66
MANUAL DE USUARIO DE PROGRAMA MODBUS.vi.....	66
ANEXO 2.....	72
MANUAL DE USUARIO ADQUISICIÓN DE DATOS EasyWeather.-.....	72



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estaciones Meteorológicas del INAMHI.....	4
Figura 2. Estaciones Meteorológicas del INOCAR.....	5
Figura 3. Espectro Electromagnético .....	12
Figura 4. Ejemplo de un día solar de 5 horas.....	14
Figura 5. Tipos de paneles fotovoltaicos.....	15
Figura 6.a) curva característica a diferentes irradiancias y b) curva característica a la misma irradiancia pero diferentes temperaturas.....	16
Figura 7. Parámetros importantes de una curva característica de un panel fotovoltaico.....	17
Figura 8. Panel solar fotovoltaico conexión serie. ....	19
Figura 9. Panel solar fotovoltaico conexión en paralelo.....	20
Figura 10. Panel solar fotovoltaico conexión aislada.....	20
Figura 11. Panel solar fotovoltaico conexión a red.....	21
Figura 12. Efecto fotoeléctrico en base a la radiación solar. ....	22
Figura 13. Mapa de Irradiación solar global del INAMHI.....	24
Figura 14. Paneles fotovoltaicos. ....	33
Figura 15. Data logger.....	34
Figura 16. Estación meteorológica.....	34
Figura 17. Fuente con respaldo de baterías. ....	34
Figura 18. Computador para almacenamiento de datos.....	35
Figura 19. Diagrama de conexiones a realizar en las entradas analógicas 1 y 2. ....	37
Figura 20. Resistencia $R_2$ real medido con un milímetro digital. ....	38
Figura 21. Irradiancia calculada en función de la irradiancia medida. ....	42
Figura 22. Sensor de potencia ( $V \cdot I$ ) en función de la Irradiancia .....	44
Figura 23. Línea de tendencia para potencia en función de la irradiancia en un rango de 400 a 800 $W/m^2$ .....	46
Figura 24. Campana de Gauss.....	48
Figura 25. Representación gráfica de la corriente en función del voltaje de los paneles fotovoltaicos.....	49

Figura 26. Corriente en función de las horas del día en el mes de Diciembre del 2013. .	51
Figura 27. Corriente en función de las horas del día en el mes de Enero del 2014.....	52
Figura 28. Corriente en función de las horas del día en el mes de Febrero del 2014. ....	53
Figura 29. Corriente en función de las horas del día en el mes de Marzo del 2014.....	54
Figura 30. Corriente en función del voltaje tomando en cuenta una resistencia variable.	57
Figura 31. Curva característica de los dos paneles fotovoltaicos conectados en serie. ....	58

## RESUMEN

El presente documento abarca un estudio y análisis de la eficiencia energética de una estación fotovoltaica con un sistema de adquisición de datos de parámetros eléctricos y ambientales en la ESPE. En el capítulo 1 se presenta información relacionada con generalidades a tomarse en cuenta para la elaboración del estudio, tales como justificación técnica y social en donde se presenta la importancia del desarrollo del estudio, antecedentes de estudios previos y objetivos trazados al marco del desarrollo de esta tesis. En el capítulo 2 se describen teóricamente los componentes y sistemas empleados en una instalación fotovoltaica, además de esquemas típicos de instalación. Además se presentan métodos de estimación de la energía generada por una instalación fotovoltaica, en el cual entre otros se destacan: el método basado en las horas de sol pico, el método basado en la función de usabilidad y métodos de simulación. En el capítulo 3 se encuentra descrita la metodología empleada que incluye el cálculo de la máxima energía generada en condiciones estándar, reales y la energía realmente generada por una instalación fotovoltaica. En el capítulo 4 se presenta la modelación matemática y estandarización del equipo de medición de eficiencia en instalaciones fotovoltaicas, se incluye además una descripción detallada de los equipos e instrumentos de adquisición de datos y control empleados, así como también las curvas características de los diferentes parámetros medidos en la instalación fotovoltaica, como son entre otros: temperatura, irradiancia, corriente, voltaje, etc. Finalmente en el capítulo 5 se incluyen costos reales de elaboración del proyecto.

PALABRAS CLAVES:

**ANÁLISIS PANEL FOTOVOLTAICO, EFICIENCIA ENERGÉTICA FOTOVOLTAICA, SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS, PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y AMBIENTALES, EFICIENCIA DE UN PANEL FOTOVOLTAICO, MAPA SOLAR ECUADOR**

## **ABSTRACT**

This paper includes a survey and analysis of energy efficiency of a photovoltaic station with a data acquisition system for electrical and environmental parameters in the ESPE. Chapter 1 presents information related to general to take into account for the design of the study, such as technical and social justification where the importance of the development of the study, a history of previous studies and objectives outlined in the development of this framework is presented thesis. In chapter 2 the components and systems used in a photovoltaic installation, plus typical installation diagrams are described theoretically. Also methods of estimating the energy generated by a photovoltaic system, which among other highlights are presented: based on peak sun hours method, role-based usability methods and simulation method. Chapter 3 is described which includes the methodology used to calculate the maximum power generated at standard conditions and actual energy actually generated by a PV system. In Chapter 4, the mathematical modeling and standardization of measurement equipment efficiency photovoltaic systems is presented further includes a detailed description of the equipment and instruments data acquisition and control employees and also the characteristic curves of different parameters measured in the PV system, such as among others: temperature, irradiance, current, voltage, etc. Finally actual processing costs of the project are included in Chapter 5.

KEYWORDS:

**ANALYSIS PHOTOVOLTAIC PANEL, PHOTOVOLTAIC ENERGY EFFICIENCY, DATA ACQUISITION SYSTEM, ELECTRICAL AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS, EFFICIENCY OF A PHOTOVOLTAIC PANEL, SOLAR MAP ECUADOR**

## ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA ESTACIÓN FOTOVOLTAICA CON UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y AMBIENTALES EN LA ESPE

Un panel fotovoltaico es un conjunto interconectado de células solares y es el componente básico de un sistema fotovoltaico. Un panel o módulo fotovoltaico se compone de una parte frontal transparente, con un perfil de goma, un vidrio frontal, un material de incrustamiento, encapsulado, células solares y lámina posterior. Está enmarcado con un marco de aluminio anodizado, en ocasiones con un acero inoxidable o con un marco de plástico.

El material de la parte delantera (superestrato) es generalmente baja en hierro y el vidrio templado. Los materiales posteriores comúnmente utilizados (sustratos) son EVA (etileno-vinilo-acetato) y PVB (polivinilo butiral). De acuerdo con la tecnología utilizada en las células solares, los paneles fotovoltaicos están clasificados como monocristalinos, policristalinos y paneles solares amorfos, y estos últimos también se conocen como paneles de película delgada (Thin film) o capa fina.

El rendimiento de un panel fotovoltaico es generalmente medido en condiciones standard de ensayo (Standard Test Conditions o STC): radiación de  $1.000 \text{ W/m}^2$  (incidencia normal), distribución espectral AM 1.5 y temperatura de la célula a  $25^\circ \text{C}$ .

Las características eléctricas de los paneles solares, incluyen numerosos parámetros, por citar algunos, incluye el tipo de célula y número, así como su interconexión. Caja de conexiones, tipo y grado IP de protección, la potencia nominal, máxima y mínima garantizada, el voltaje de circuito abierto, intensidad de cortocircuito, corriente y tensión máxima de potencia y tensión máxima del sistema interconectado. También el fusible, diodos bypass,

cableado de conexión y longitud, los conectores y tipo, eficiencia del panel, la tolerancia de la potencia máxima y los coeficientes de temperatura. En cuanto a la temperatura existe una variable que es la temperatura de operación nominal de las células (NOCT o Nominal Operation Cell Temperature): radiación de  $800 \text{ W/m}^2$  (incidencia normal), distribución espectral AM 1.5, temperatura ambiente de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y velocidad del viento de  $1 \text{ m/s}$ .

La medida más interesante y motivo de estudio de esta tesis, es la eficiencia del panel, o qué porcentaje de energía de la luz que incide en el panel se convierte en electricidad. Usted debe ser consciente, sin embargo, que la eficiencia de la célula solar no es igual a la eficiencia del panel. La eficiencia del panel es generalmente de 1 a 3% inferior a la eficiencia de células solares debido a la reflexión de vidrio, marco de sombra, las temperaturas más altas, etc. Por eso algunos fabricantes pueden hablar de la eficiencia de su célula en lugar de la eficiencia del panel.

Una segunda medida del rendimiento es la tolerancia de potencia, que indica el rango de potencia nominal que el fabricante puede garantizar. Por ejemplo, una tolerancia final -3% inferior significa que la potencia pico real podría ser 3% inferior a la potencia nominal indicada.

La tercera medida importante es el rendimiento de los coeficientes de temperatura que muestran cómo los resultados del panel seguirá los cambios de temperatura. Tres coeficientes de temperatura más comunes están disponibles en las hojas de datos del panel, y deben considerarse como parámetros importantes en la etapa de diseño de los sistemas fotovoltaicos.

# **CAPÍTULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 Justificación técnica, social, económica y ambiental**

Cuando se construyó la primera célula fotovoltaica en 1883 solo se obtenía una eficiencia de 1%, con el pasar de los años se ha mejorado los materiales que lo componen. Hoy en día se ha logrado llegar a una eficiencia del 28% en laboratorio por lo que es indispensable un estudio con condiciones ambientales reales de la eficiencia de un panel en el transcurso del día.

Es predecible que las fuentes energéticas basadas en petróleo, gas natural y carbón se agoten en un futuro próximo. Ni aún la estimación más optimista de reservas adicionales justifica un consumo continuo. (Jaramillo Salgado, 2008)

Actualmente el uso de energías alternativas va en aumento ya que se ha concientizado a nivel mundial la disminución de emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

En Ecuador las energías renovables están tomando un gran impulso gracias a la inversión gubernamental, así se tiene parques eólicos en Galápagos y fotovoltaicos con fines sociales para abastecer de energía eléctrica a pequeñas chozas en comunidades alejadas de las ciudades en el Oriente Ecuatoriano.

Una desventaja evidente del implemento de grandes centrales de generación fotovoltaica es la necesidad de cubrir con paneles grandes extensiones de terreno, por esta razón no sería viable reemplazar totalmente las fuentes de energía actuales.

Curaray en la provincia de Pastaza tiene un sistema de 1,6 kilovatios de energía fotovoltaica que alimenta tres bombas de agua que proporcionan agua potable y limpia a la aldea. (Levitin, Enero 2011)

Para sacarle el mayor provecho a grandes centrales de generación fotovoltaica se debe conectar los paneles solares directamente a la red de la empresa eléctrica a través de inversores, esto elimina los problemas que derivan el uso de baterías y maximiza el uso de toda la energía generada por el panel.

El principal inconveniente que enfrenta implementar paneles fotovoltaicos es el costo de construcción y el costo para reciclar el equipo al terminar su vida útil, para construir los paneles fotovoltaicos es actualmente necesario otra fuente de energía que genera emisiones contaminantes.

El tiempo de recuperación de la energía invertida en la construcción del panel fotovoltaico, TREI, se calcula dividiendo la energía cautiva de un panel entre la tasa de generación energética del sistema.

$$\text{TREI} = \text{energía cautiva (kWh)} / \text{generación energética anual (kWh/año)}$$

Un estudio hecho en 2006 por CrystalClear, un proyecto para el desarrollo de las tecnologías fotovoltaicas, calculó el TREI para los diferentes tipos de células fotovoltaicas utilizando como referencia la radiación solar del sur de Europa, de unos 1.700 kWh · m<sup>2</sup> · año. Mientras en 1975 se calculaba que el TREI de la mayoría de paneles era de 20 años (en aquel momento, en una superficie de un metro cuadrado la potencia eléctrica posible era un 20 % de la actual), en 2006 se calculó que con la radiación solar del sur de Europa el TREI para los monocristalinos era de 2 años y para los policristalinos de 1,7 años. (Terra, 2010)

En Ecuador el rendimiento de los paneles solares no necesariamente reflejaría una alternativa para reemplazar las fuentes de energía convencionales como las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas. La instalación de paneles solares supone una alta inversión inicial, aunque el



período de vida se estima en 25 años, se necesitan de al menos 14 años para recuperar el costo inicial, sin contar el costo por mantenimiento periódico necesario para prolongar la vida útil de los paneles.

El costo de reciclar los paneles fotovoltaicos reduce las emisiones hasta en un 45%. (Kim, Goldsmidt, Pampena, Marcos, & Martínez , 2008).

Los paneles solares contienen materiales valiosos que pueden ser recuperados para la fabricación de nuevos módulos u otros productos, como el silicio o metales preciosos.

El proceso común de reciclaje dependiendo de la tecnología del panel solar es el siguiente: se comienza con la retirada del marco de aluminio del módulo, después se aplica un proceso mecánico o térmico para separar las diferentes fracciones y finalmente se aplica un proceso químico.

Los materiales reciclados son principalmente el vidrio, el aluminio, el cobre de los cables, el silicio y otros semiconductores valiosos que se pueden utilizar para fabricar nuevos paneles. Actualmente se puede llegar a reciclar hasta el 85% del panel desechado, lo cual es un porcentaje muy elevado comparado con otros procesos de reciclaje.

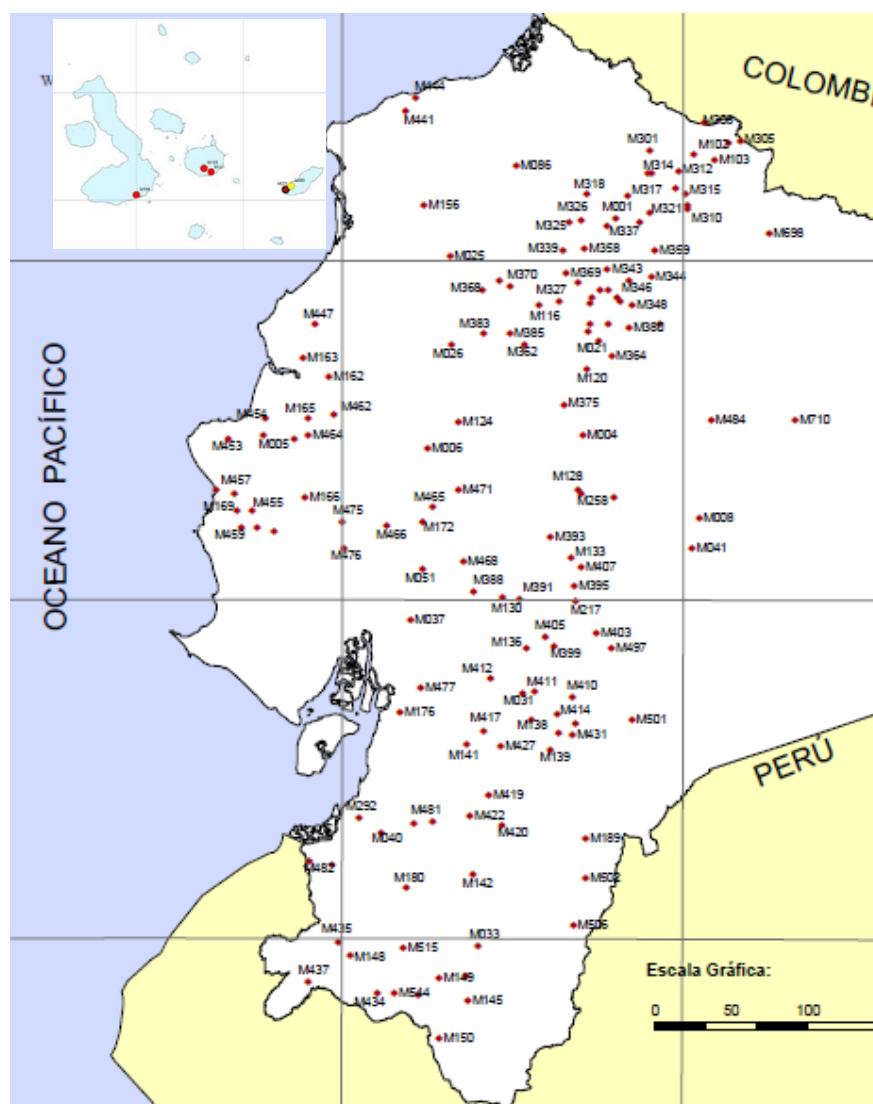
Considerando el creciente uso de paneles solares, y el hecho de que los primeros que se instalaron ya están finalizando su vida útil, se espera que se produzca próximamente un boom de residuos entre el año 2020 y 2025.

En Ecuador cuando termina la vida útil de un panel fotovoltaico se entrega a gestores autorizados como por ejemplo: INCINEROX, RECICLAR, PLUSAMBIENTE, etc. Los mismos crean stock y mediante convenios entregan a gestores ambientales internacionales.

En grandes cantidades el costo del transporte para llevar a la planta recicladora los paneles solares depende del tipo de convenio con el gestor ambiental.

## 1.2 Antecedentes

En Ecuador el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) tiene funcionando 262 estaciones meteorológicas propias ubicadas geográficamente como se aprecia en la figura 1.



**Figura 1.** Estaciones Meteorológicas del INAMHI. (INAMHI, [www.serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca/](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca/), 2013)

Tanto la ubicación como la toma de datos de las estaciones se basan en lo que recomiendan las normas internacionales establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM)

El Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR) tiene a su cargo 7 estaciones meteorológicas como se observa en la figura 2. Estas estaciones se encuentran ubicadas a lo largo de la costa ecuatoriana recolectando información que data desde 1948.



**Figura 2.** Estaciones Meteorológicas del INOCAR.  
([www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/estaciones-meteorologicas](http://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/estaciones-meteorologicas), 2013)

Existen además estaciones meteorológicas pertenecientes a otras instituciones como la Dirección de Aviación Civil, universidades, empresas de agua potable entre otras que en la mayoría de casos entregan sus datos históricos al INAMHI para una convalidación anual de información.

Los principales datos que obtienen estas estaciones meteorológicas son:

- Temperatura ambiente.
- Humedad.
- Radiación global
- Velocidad del viento.
- Precipitaciones.
- Heliofania (mediante un lente quema un papel y registra el tiempo de duración del brillo solar).
- Evaporación.
- Nubosidad.

Para un fácil inventario de datos el INAMHI ha clasificado a las estaciones meteorológicas de la siguiente manera:

- AP Agrometeorológica
- CP Climatológica Principal
- CO Climatológica Ordinaria
- CE Climatológica Especial
- AR Aeronáutica
- RS Radio Sonda
- PV Pluviométrica
- PG Pluviográfica
- PC Plataforma Colectora de Datos
- AN Anemográfica

En Ecuador durante los últimos 15 años el INAMHI ha instalado 13 estaciones que obtienen datos útiles para diseño de estaciones fotovoltaicas como se indica en la tabla 1.

Tabla 1

Estaciones con datos de radiación global instaladas en los últimos 15 años por el INAMHI. (INAMHI, 2013)

Código	Nombre	Tipo	Provincia	Estado	Año
MA37	LAGUACOTO - GUARANDA	CP	BOLIVAR	FUNCIONANDO	2003
M084	BOLIVAR	CP	CARCHI	FUNCIONANDO	2003
MB84	PUJILI	CP	COTOPAXI	FUNCIONANDO	2003
M156	QUININDE	CP	ESMERALDAS	FUNCIONANDO	2003
M194	PUERTO VILLAMIL	CP	GALAPAGOS	FUNCIONANDO	2002
MB81	NOBOL	CP	GUAYAS	FUNCIONANDO	2001
MB88	NAMBACOLA	CP	LOJA	FUNCIONANDO	2004
MB97	ESPAM-MFL- CALCETA	CP	MANABI	FUNCIONANDO	2010
MB82	LA TEODOMIRA	CP	MANABI	FUNCIONANDO	2002
MB98	ILLINIZA-BIGROSES	CP	PICHINCHA	FUNCIONANDO	2011
MB06	SANTA ELENA	CP	SANTA ELENA	FUNCIONANDO	2001
MB77	LUMBAQUI	CP	SUCUMBIOS	FUNCIONANDO	2003
MB92	TARAPOA	CP	SUCUMBIOS	FUNCIONANDO	2008

En el campo de los paneles fotovoltaicos en Ecuador políticamente existe un gran interés por impulsar las energías alternativas, muestra de esto es la creación de un ministerio de energías renovables.

Existen dos formas de usar la energía eléctrica generada por un panel fotovoltaico estas son con conexión a red y aislada.

Para el año 2000 el gobierno introdujo una tarifa de inyección de energía a la red generada con paneles solares con un pago de 57 centavos de dólar por kilovatio hora proveniente de generación fotovoltaica pero está terminó en el 2009 sin grandes éxitos, sin embargo dos ejemplos de instalaciones fotovoltaicas de poca potencia conectadas a la red son el primero instalado

en el 2002 con una capacidad de 10 kilovatios ubicado en el barrio Bellavista de Quito en la denominada Capilla del Hombre y el segundo instalado en Juncal en el año 2009 con capacidad de 7 kilovatios.

Desde el 2007 se ha dado impulso en gran escala para la generación con paneles fotovoltaicos aislados, se ha destinado un presupuesto de 55 millones de dólares que tiene como objetivo la instalación de sistemas fotovoltaicos de 200 vatios en 15000 hogares de la región amazónica por lo que se espera instalar 3 megavatios con este proyecto. En el 2010 se tenía una potencia fotovoltaica instalada en el Ecuador de 1,4 megavatios, por lo que se espera duplicar fácilmente la capacidad instalada.

En el 2008 la Corporación para la Investigación Energética (CIE) publicó un Atlas Solar de 50 páginas producto de una investigación de 6 años que sirvió de guía a los planificadores energéticos para seleccionar los lugares más idóneos donde instalar sistemas fotovoltaicos.

En Curacay situada en el extremo del Parque Nacional Yasuní, se ha instalado paneles solares de 1,6 kW usados para bombeo de agua que benefició a 350 comuneros. También en Galápagos se han instalado paneles solares con capacidad de 21 kilovatios ubicados en la isla Floreana y se tiene proyectado para el 2020 formar una pequeña red entre las islas para satisfacer casi en su totalidad la demanda eléctrica por medio de energías renovables como la fotovoltaica, eólica y de biomasa.

Considerando que la energía tiene un gran valor en el desarrollo de un país es necesario realizar estudios a fondo donde se pueda optimizar los beneficios del uso de las nuevas tecnologías de energías renovables.

Ecuador como país tiene beneficios en cuanto a energía fotovoltaica por encontrarse en la línea ecuatorial, si se optimiza el recurso solar mediante el conocimiento de un perfil de radiación se puede mejorar la implementación de paneles solares a nivel nacional.

Existe un incipiente conocimiento del funcionamiento del panel fotovoltaico en microclimas ecuatorianos, por lo que dará lugar a errores de diseño para centros de generación fotovoltaico de gran escala.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Determinar, la influencia de los parámetros medio ambientales (radiación global) en los parámetros eléctricos de un panel fotovoltaico para determinar metodologías de eficiencia energética al aplicarlo en una instalación fotovoltaica manteniendo un registro continuo de monitoreo cuyos datos servirán para la comparación de un modelo estadístico con un modelo físico.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Analizar el mapa solar de la zona.
- Dimensionar un prototipo de estación fotovoltaica que permita adquirir parámetros eléctricos y ambientales.
- Analizar la variación de los parámetros eléctricos bajo la influencia de la Radiación Solar en instalaciones fijas conectadas en serie o en paralelo.
- Determinar las posibilidades de aprovechamiento de esta tecnología de medición para contribuir al dimensionamiento óptimo de nuevas instalaciones fotovoltaicas.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Generalidades sobre la energía solar**

La adquisición de datos por medio de una estación para análisis de paneles fotovoltaicos permite optimizar el diseño de centrales de generación fotovoltaica que ayudan a mitigar la gran cantidad de emisión de gases contaminantes alrededor del mundo, relacionados con los procesos de generación de energía eléctrica por medios convencionales.

Actualmente se han desarrollado diversas tecnologías para aprovechar las energías alternativas, las cuales tienen como principal fuente de energía los recursos renovables como la eólica, la energía solar fotovoltaica y la energía hidráulica, son ejemplos donde se han desarrollado tecnologías que convierten la velocidad del viento, la radiación solar y el flujo del agua en energía eléctrica.

Cabe recalcar que la energía eólica y la hidráulica son consecuencia también de la acción directa de los rayos solares que inciden en el planeta tierra. La cantidad de energía solar recibida anualmente por la tierra es  $1,5 \times 10^{18}$  kWh y representa 10.000 veces el consumo de energía del planeta en ese mismo periodo. ( Lamaison, 2009)

La energía solar fotovoltaica y su armonía con el medio ambiente la convierte en una gran alternativa para abastecer de energía algunas áreas que no tienen servicio normal de energía eléctrica, por motivo de su ubicación geográfica y dada la dificultad de instalar redes de suministro.

El costo de generación de energía mediante paneles fotovoltaicos es todavía alto; fluctúa entre \$ 0,20 – 0,30 por kWh generado. (Chavéz Guerrero, 2012)



Transformar la radiación solar en energía eléctrica se conoce como energía solar fotovoltaica, forma parte de las energías renovables y es un método de obtención de energía eléctrica que está teniendo bastante acogida por sus ventajas ambientales y el ahorro económico que suponen a largo plazo. Los paneles fotovoltaicos, los inversores, las baterías y los controladores forman un conjunto llamado sistema fotovoltaico. Los sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar permiten aumentar el rendimiento de los paneles de manera significativa. (Grassi & Ansaldo, 2012)

La radiación solar es un recurso renovable y disponible en casi todo el mundo para satisfacer la demanda energética que está en constante crecimiento. Al dejar de lado la inversión económica inicial que se debe realizar para implementar el sistema fotovoltaico, se puede disminuir gran parte la contaminación ambiental.

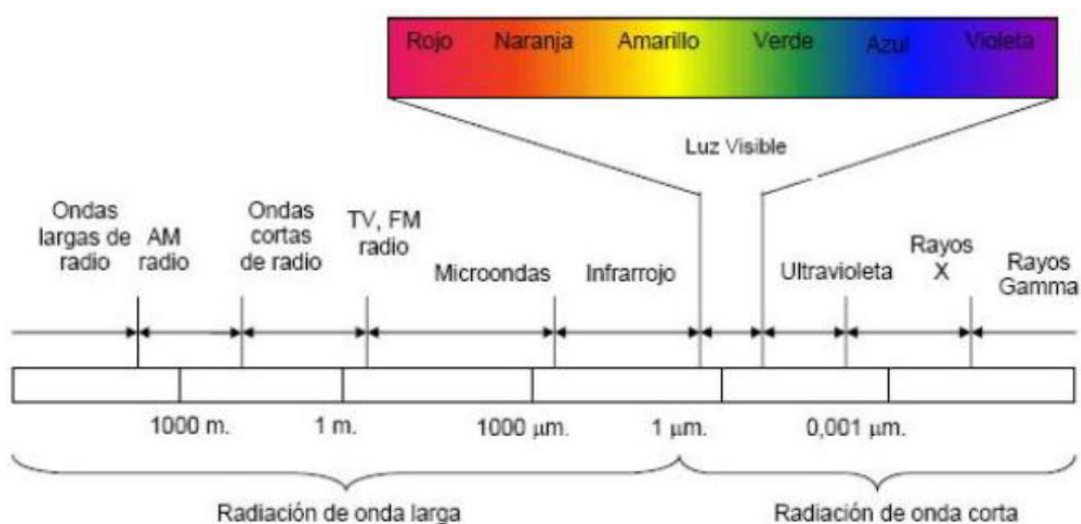
Países industrializados como Alemania, España, Canadá, Japón y Estados Unidos son pioneros en la utilización de sistemas fotovoltaicos para su autoabastecimiento energético, debido en gran parte a la sensibilización de la población sobre los beneficios ecológicos y económicos que con lleva implementar este tipo de sistemas.

En España, por ejemplo, se implementa generación de electricidad con paneles fotovoltaicos conectados a la red de la empresa de distribución eléctrica, lo que nos hace pensar que no necesariamente el dueño de los paneles solares consume la energía generada por los mismos, lo más probable es que esta energía sea consumida por sus vecinos. Como la energía que genera en exceso el panel es vendida a la empresa eléctrica local, la alta inversión inicial se convierte en ganancia con el pasar de los años.

## RADIACIÓN SOLAR

Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol, en todas las longitudes de onda existentes. Consta de luz visible, luz infrarroja y luz ultravioleta, según se observa en la figura 3.

La luz visible se compone de los colores rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta, los cuales poseen una longitud de onda específica entre  $0,43\ \mu\text{m}$  y  $0,69\ \mu\text{m}$ . Por otra parte, las ondas que se encuentran en la parte infrarroja del espectro electromagnético se encuentran en un rango entre  $0,7\ \mu\text{m}$  y  $5\ \mu\text{m}$ , y las ondas que se encuentran en la zona ultravioleta están entre  $0,3\ \mu\text{m}$  y  $0,4\ \mu\text{m}$ .



**Figura 3. Espectro Electromagnético (Camargo Carvajal & Dallos Castellanos, 2011)**

La radiación solar se divide en tres tipos, teniendo como base para dicha división la forma en cómo se recibe en la superficie de la tierra. La suma de todas las radiaciones recibe el nombre de radiación solar global (H).

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

Radiación difusa ( $H_d$ ): es aquella radiación que al momento de atravesar la atmósfera es absorbida o reflejada por las nubes y por ende, se dirige en todas las direcciones.

Radiación reflejada: es aquella al momento de llegar a la superficie terrestre, es reflejada por la misma. La cantidad de radiación reflejada depende únicamente del coeficiente de reflexión de la superficie, al cual se le denomina Albedo.

### IRRADIANCIA (G)

Es la potencia instantánea de radiación solar recibida por unidad de superficie, su unidad según el Sistema Internacional de medidas (SI) es  $\text{kW/m}^2$ .

Con la irradiancia se puede calcular la generación de energía eléctrica proveniente de un panel fotovoltaico teniendo en cuenta la potencia de este. Para calcular dicha generación se debe expresar el día solar como un valor promedio fijo que debe tener las variaciones de la irradiancia para el lugar donde se va a instalar el sistema fotovoltaico.

### IRRADIACIÓN O INSOLACIÓN (H)

Corresponde al valor obtenido al integrar la irradiancia en un determinado periodo, y se define como la potencia incidente por unidad de superficie en determinado tiempo. Según el sistema internacional de medidas, su unidad es el  $\text{kWh/m}^2$ . Se usa "H" para referirse a la insolación diaria e "I" para la insolación horaria.

### HORA SOLAR PICO (HSP)

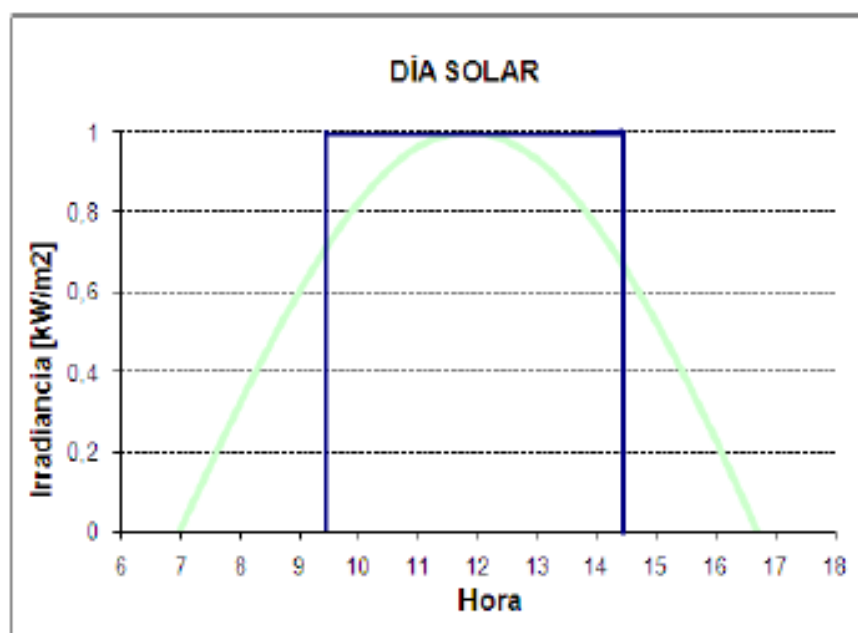
La Hora Solar Pico se define como la energía recibida durante el periodo de una hora a una irradiancia promedio de  $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ .

Para determinar el número de horas en el que el panel fotovoltaico es capaz de generar la potencia máxima especificada por el fabricante, los

paneles son evaluados teniendo en cuenta un valor de intensidad luminosa de  $1 \text{ [kW/m}^2\text{]}$  y la duración del día solar promedio.

### DÍA SOLAR (DS)

Es el valor promedio de horas en el cual un panel (con radiación constante de  $1 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ ) es capaz de generar la misma energía entregada por el sol, en cierto tipo de zona, en la figura 4 se puede observar un ejemplo de un día solar de 5 horas.



**Figura 4.** Ejemplo de un día solar de 5 horas (Camargo Carvajal & Dallos Castellanos, 2011)

### CONSTANTE SOLAR (ISC)

Es la energía solar incidente sobre una superficie normal a los rayos del sol a una distancia de una unidad astronómica (1 UA) en todas las longitudes de onda. Su valor según la escala del WRC (World Radiation Reference Centre) es de  $1367 \text{ [W/m}^2\text{]}$ .

El panel fotovoltaico está compuesto por varias células solares hechas de materiales semiconductores que pueden convertir la luz del sol en electricidad.

Existen células fotovoltaicas mono cristalinas, poli cristalinas y amorfas como se observa en la figura 5.



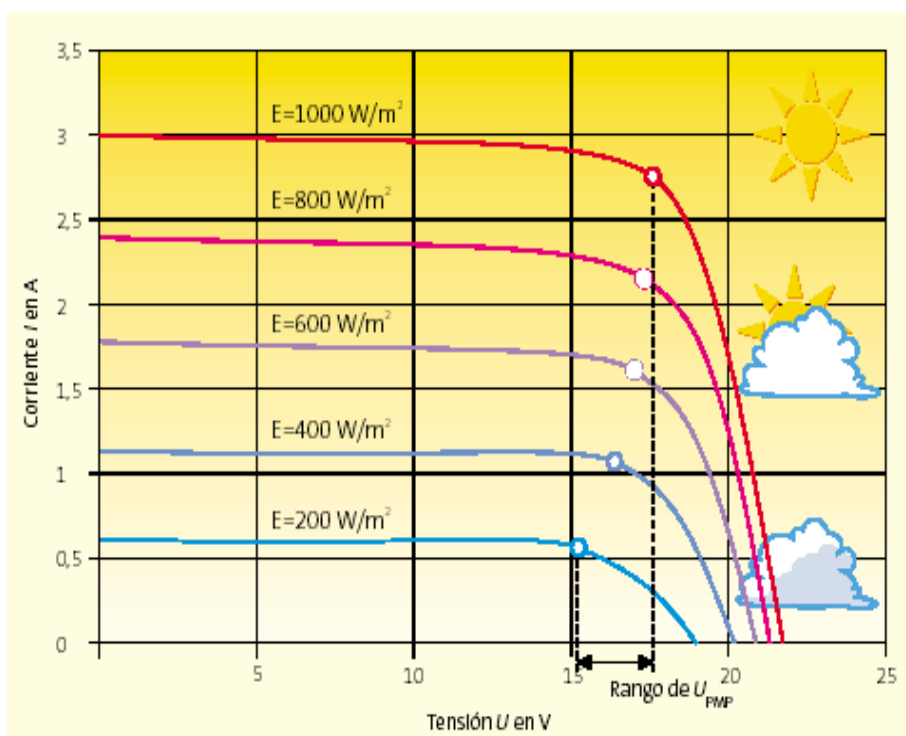
**Figura 5.** Tipos de paneles fotovoltaicos

La diferencia radica en que las amorfas son más baratas pero de muy baja eficiencia alrededor del 8%.

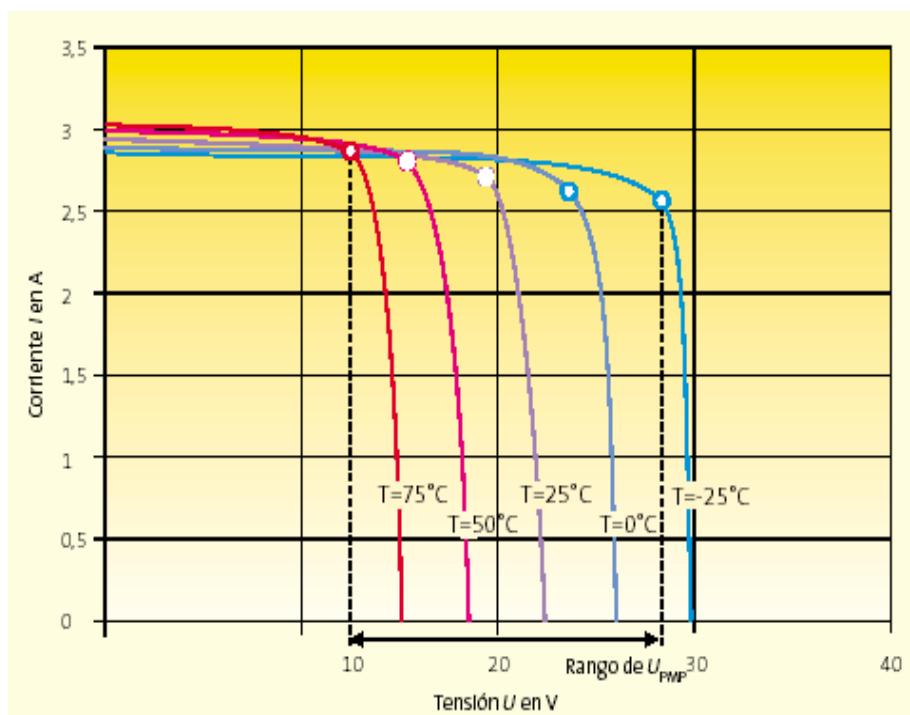
El panel Poli cristalino es un poco más costoso y su eficiencia está alrededor del 14%.

El panel mono cristalino es más caro y su eficiencia es mayor a los paneles fotovoltaicos anteriores, alrededor del 16%.

La curva característica de un panel fotovoltaico se puede ver afectada por el nivel de irradiancia y por la temperatura ambiente como se aprecia en la figura 6 a) y 6 b).



**Figura 6.a)** Curva característica a diferentes irradiancias.



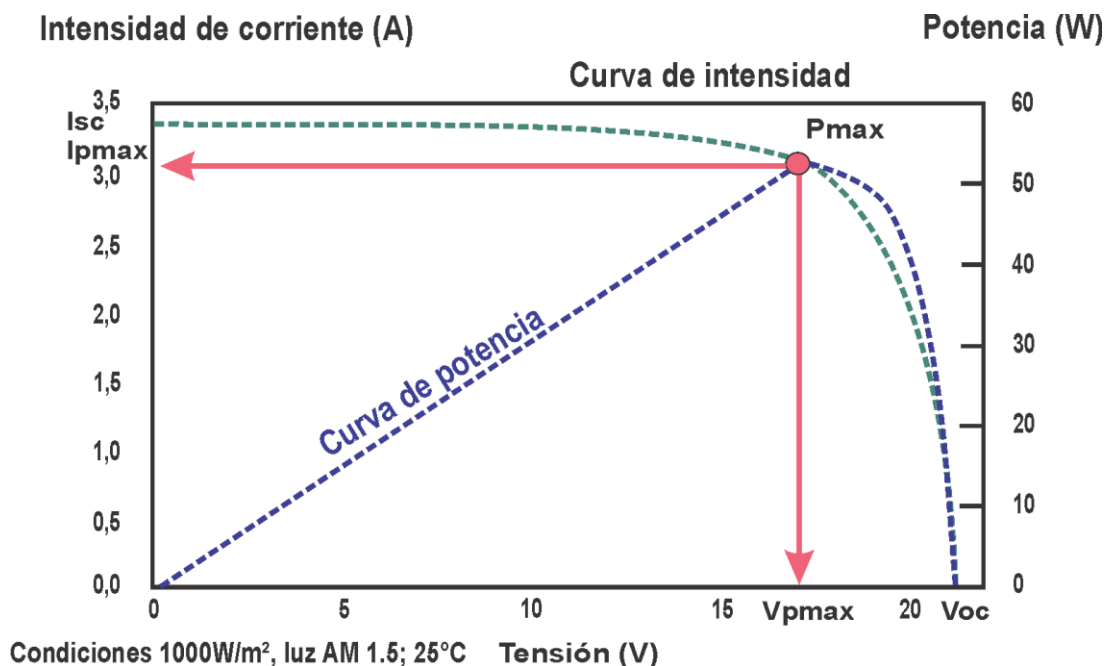
**Figura 6.b)** curva característica a la misma irradiancia pero diferentes temperaturas.

Los parámetros más importantes dentro de la curva característica de un panel fotovoltaico son:

- Corriente de corto circuito [A] ( $I_{sc}$ ) es la máxima corriente que producirá el dispositivo correspondiente a un voltaje igual a cero.
- Voltaje de circuito abierto [V] ( $V_{oc}$ ) máximo voltaje del dispositivo correspondiente a una corriente igual a cero.
- Potencia pico nominal [W] ( $P_{max}$ ) es la máxima potencia que producirá el dispositivo correspondiente al par máximo I-V.
- Corriente [A] ( $I_{pmax}$ ) es el valor de la corriente para  $P_{max}$ .
- Voltaje [V] ( $V_{pmp}$ ): Es el valor de voltaje para  $P_{max}$ .

Estos parámetros se pueden apreciar mejor en la figura 7, donde están medidos como función de la temperatura a  $25^{\circ}\text{C}$  e irradiancia de  $1000\text{ W/m}^2$ .

La influencia de la temperatura sobre la curva característica de una célula es notable, se estima que la tensión a circuito abierto desciende  $-2.45\text{ mV}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{cel})$ . (Sanchez, 2004)



**Figura 7.** Parámetros importantes de una curva característica de un panel fotovoltaico. (Pocco Ramirez, 2010)

Otro parámetro para la elección del panel solar es el Factor de forma (FF) que correspondiente al cociente entre Pmax y el producto de Isc x Voc. Puede venir expresado en tanto por ciento o tanto por uno, siendo el valor 100% el que corresponderá a un hipotético perfil no real. Nos da una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico, siendo éste tanto mejor cuánto más alto sea su factor de forma.

$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (\text{Schumann, 2005}) \quad (1)$$

Donde:

$P_{MAX}$ : Potencia máxima dada por el producto de  $I_{pmax}$  con  $V_{pmax}$ .

Voc: Voltaje de circuito abierto.

Vsc: Voltaje de corto circuito.

## 2.2 Dimensionamiento de instalaciones fotovoltaicas

Para el dimensionamiento de las instalaciones fotovoltaicas se debe considerar los siguientes aspectos:

### UBICACIÓN

Hay que tomar en cuenta que el sitio donde se monten los paneles solares esté limpio y no tengan influencia de sombras, porque disminuyen considerablemente la eficiencia del panel, también debe contar con fácil acceso.

### DEMANDA A SATISFACER.

Dependiendo de la cantidad de potencia que se alimentará se puede escoger tantos paneles como sea necesario considerando que por lo general con paneles de 80W pico a 16V podemos sacar 5 A. También es necesario tratar de evitar los inversores porque también consumen energía, lo



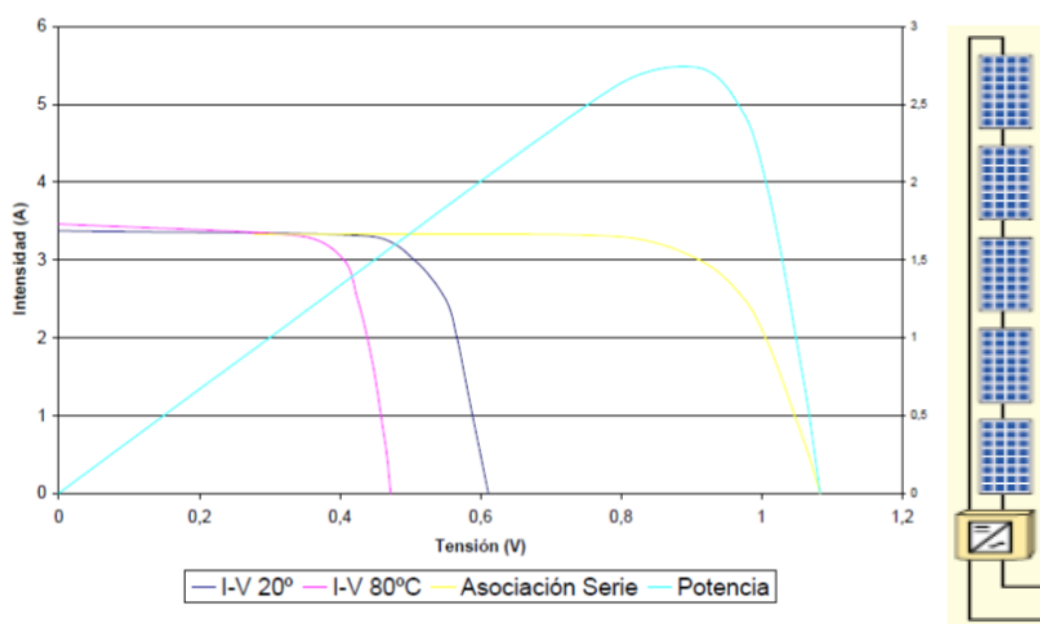
recomendable es que para instalaciones aisladas toda la carga sea a corriente continua.

## TIPOS DE CONEXIÓN

Los paneles solares fotovoltaicos según su uso y forma de conexión se clasifican en:

- Paneles fotovoltaicos conectados en serie.

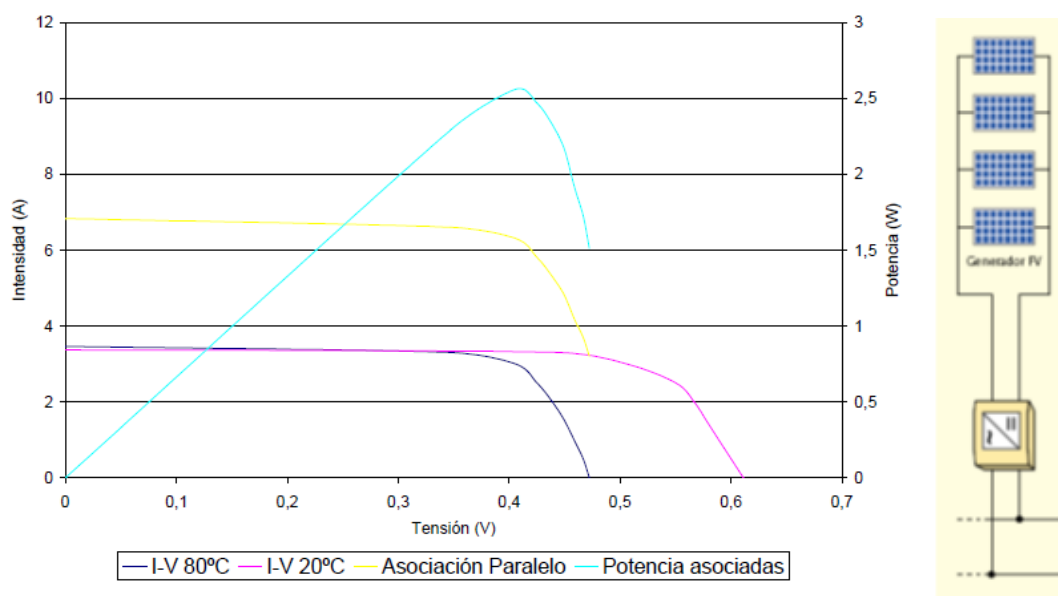
Esta conexión tiene la ventaja de aumentar el voltaje de salida pero el inconveniente que presenta es que si se necesita dar mantenimiento a uno se deben apagar todos los paneles, como se observa en la figura 8.



**Figura 8.** Panel solar fotovoltaico conexión serie.

- Paneles fotovoltaicos conectados en paralelo.

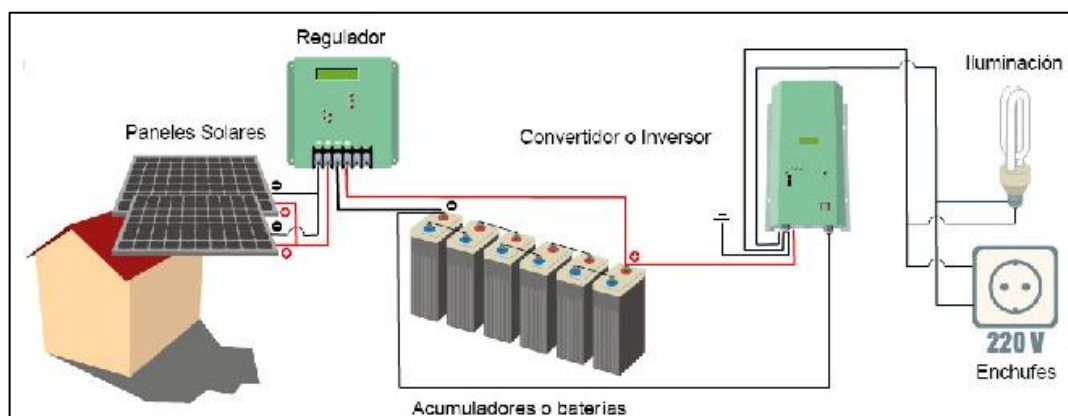
La ventaja de conectar en esta forma es que se puede dar fácil mantenimiento a uno de los paneles en caso de ser necesario como se muestra en la figura 9.



**Figura 9.** Panel solar fotovoltaico conexión en paralelo.

- Paneles fotovoltaicos con conexión aislada de la red.

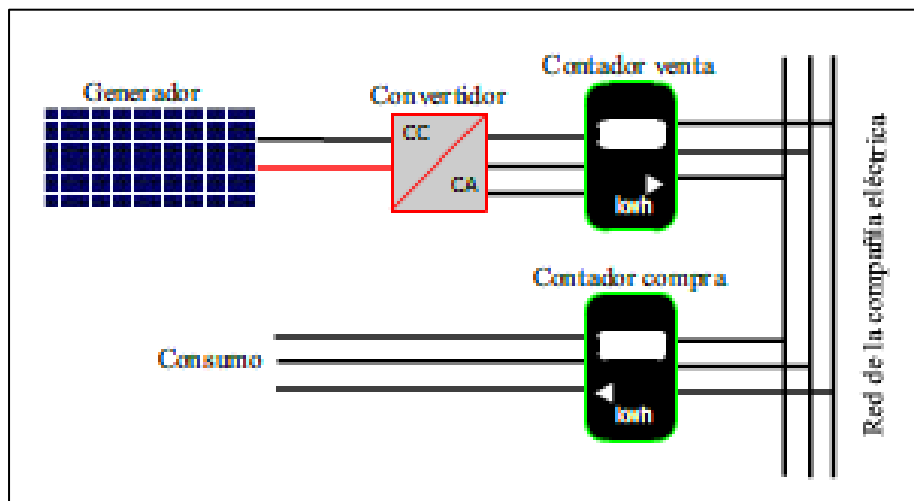
Esta conexión es muy costosa y se usa en lugares muy apartados de las ciudades como por ejemplo para bombeo de agua e iluminación. Las conexiones se muestran en la figura 10.



**Figura 10.** Panel solar fotovoltaico conexión aislada.

- Paneles fotovoltaicos conectados a una red de una empresa eléctrica de distribución. Esta es la conexión más esperada en todos los hogares a futuro porque permite inyectar a la red de la empresa eléctrica de

distribución toda la energía generada que no necesariamente ocupará el propietario de los paneles fotovoltaicos, como se muestra en la figura 11.



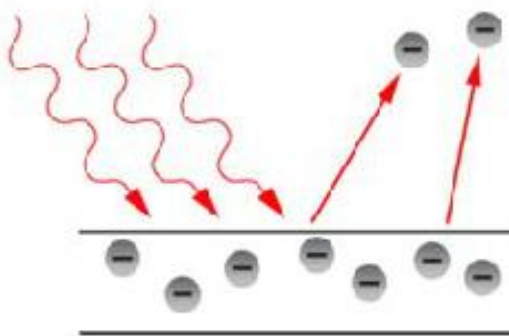
**Figura 11.** Panel solar fotovoltaico conexión a red.

## EQUIPOS ADICIONALES A USAR.

Luego de establecer la ubicación el tipo de conexión y demanda se determinarán los equipos adicionales como regulador de voltaje, inversor o convertidor y protecciones.

### 2.3 Efecto fotovoltaico

Cuando incide luz en un panel fotovoltaico dentro de él se rompen enlaces entre los pares electrón-hueco como se muestra en la figura 12 esto hace que se liberen electrones en la unión de los materiales tipo P-N y antes de volver a combinarse los electrones forman la corriente eléctrica que circula por la célula, a este fenómeno se lo conoce como Efecto Fotovoltaico.



**Figura 12.** Efecto fotoeléctrico en base a la radiación solar.

## 2.4 Eficiencia teórica y real del panel

La eficiencia teórica del panel fotovoltaico es calculada por el fabricante en laboratorios donde puede controlar parámetros externos como radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento. Estos parámetros en la realidad son muy aleatorios por lo que la eficiencia se ve directamente afectada. Teniendo en cuenta que el panel carece de partes móviles y que las celdas y los contactos van encapsulados en una resina sintética, se consigue una muy buena fiabilidad junto con una larga vida útil, del orden de 30 años o más. (Villalta, 2005)

Para descartar errores se recomienda calcular la eficiencia ( $\eta$ ) del panel fotovoltaico la cual determina la cantidad de energía solar que es aprovechada para generar energía eléctrica, y se define por el cociente entre la potencia máxima que entrega el panel ( $P_{MAX}$ ) y la potencia de la radiación solar que incide sobre la superficie del panel ( $P_L$ ).

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_L} \quad (2)$$

De lo que se deduce:

$$\eta = \frac{V_M \times I_M}{E \times A_C} \quad (3)$$

Dónde:

- E: energía solar que llega al panel en condiciones estándar, es decir una temperatura de las celdas de 25 °C, a nivel del mar, y con una irradiación solar de 1 kW/m<sup>2</sup>.
- A<sub>c</sub>: área del panel fotovoltaico.

También se puede calcular la irradiancia que llega al panel fotovoltaico en función de la temperatura de operación de la célula por medio de la ecuación 4:

$$I = \frac{T_p - T_a}{T_{ONC} - 20} * 800 \quad (4)$$

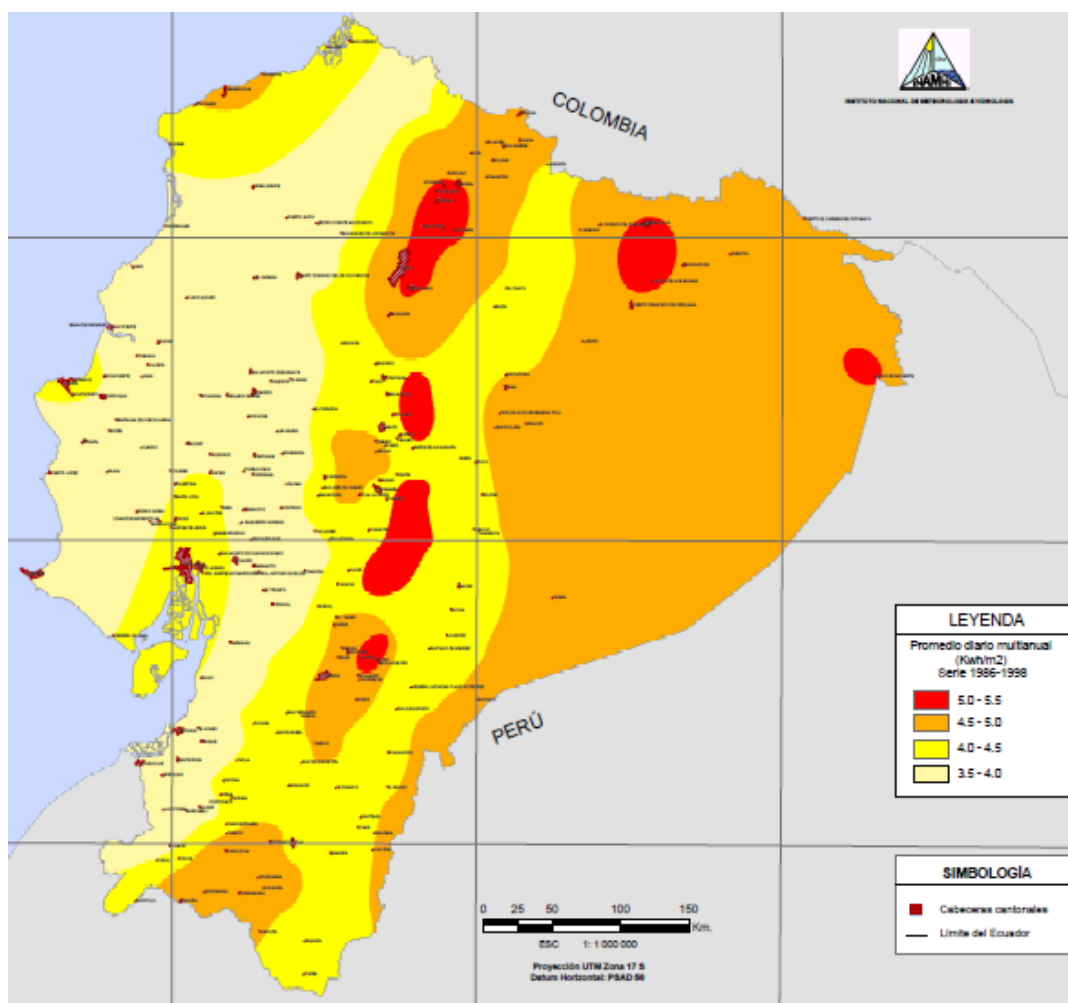
Dónde:

- I: irradiancia (W/m<sup>2</sup>)
- T<sub>p</sub>: temperatura del panel (°C)
- T<sub>a</sub>: temperatura ambiente (°C)
- T<sub>ONC</sub> : temperatura de operación nominal de la célula (°C).

## 2.5 La radiación solar local

De los valores obtenidos por las estaciones meteorológicas del IMAMHI se ha formado un mapa solar nacional que puede dar una idea muy general de lo que esperamos en la hipótesis planteada.

Como se observa en la figura 13 una gran cantidad de irradiación solar global se presenta en la zona de la ciudad de Quito con un promedio diario multianual de 5.5 kWh/m<sup>2</sup>.



**Figura 13.** Mapa de Irradiación solar global del Ecuador. (CONELEC, 2009)

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

#### 3.1. Máxima energía generada en condiciones estándar.

La determinación de la máxima energía que una instalación fotovoltaica puede producir en condiciones estándar se realiza bajo las siguientes consideraciones:

- Toda la radiación se recibe a un nivel de irradiancia de  $1000\text{W/m}^2$ . la irradiancia en un plano horizontal ubicado sobre la superficie terrestre alcanza un valor máximo de  $1000\text{ (W/m}^2\text{)}$  durante el mediodía y cielo claro. (Herrera Medina & Molina Palma, 2010)
- La temperatura de los módulos es siempre  $25^\circ\text{C}$ , independientemente de las condiciones ambientales de cada localización
- La radiación incidente que se considera en el generador fotovoltaico es la real pero con una distribución de irradiancia constante e igual a  $1000\text{ W/m}^2$ .
- No existen ninguna de las pérdidas susceptibles de producirse en instalaciones de este tipo (módulos sin tolerancias, todos orientados e inclinados de la misma forma, sin pérdidas por sombreado, suciedad, ni en el cableado, ni en inversor.
- El rendimiento del campo solar permanece constante. Es el correspondiente a las condiciones de irradiancia y temperatura del panel supuestas ( $1000\text{ W/m}^2$  y  $25^\circ\text{C}$ , respectivamente).

La energía producida por la instalación se calcula según la expresión 5:

$$E_{\text{red}} = A \cdot H_t^\alpha \cdot n_{\text{cs}} \cdot n_{\text{inv}} \cdot n_p \quad (\text{Cruz Fajardo, 2006}) \quad (5)$$

Dónde:

- $E_{\text{red}}$  es la energía que se inyecta en la red.

- $A$  es la superficie del generador.
- $H_t^\alpha$  es la radiación que recibe el generador, inclinado un ángulo  $\alpha$  para el cual se maximiza la energía incidente en un periodo de tiempo  $t$ , que se considera el año.
- $n_{cs}$  es el rendimiento del campo solar calculado para las condiciones estándar.
- $n_{inv}$  es el rendimiento del inversor, que en este caso se considera igual a la unidad.
- $n_p$  engloba el resto de pérdidas que pueden darse en una instalación. En este caso, como se ha comentado al inicio, se considera igual a la unidad.

### **3.2. Máxima energía generada en condiciones reales.**

Las hipótesis que se realizan para determinar la máxima energía que puede producir una instalación fotovoltaica son las siguientes:

- Los módulos son idénticos con igual orientación e inclinación.
- No existen pérdidas por efecto Joule, en ningún elemento de la instalación como cables, interruptor, conexiones, etc.
- No existen pérdidas por sombreados, suciedad, etc.
- El generador fotovoltaico siempre trabaja en el punto de máxima potencia.
- La radiación incidente que se considera en el generador fotovoltaico es la real.
- La temperatura del módulo se va a determinar en función de las condiciones climáticas en cada momento.

En este proyecto se considera la energía máxima como la energía que puede producir un generador fotovoltaico funcionando bajo las hipótesis anteriores y en condiciones estándar.



Para determinar la energía máxima se ha procedido de la siguiente forma:

1. Selección de datos de partida.
2. Asignación de una temperatura media del generador fotovoltaico a cada intervalo de irradiancia.
3. Cálculo de la eficiencia del generador fotovoltaico por intervalos de tiempo.
4. Sumatorio del comportamiento de la instalación por intervalos de irradiancia para un cierto periodo, para nuestro estudio tres meses.

A continuación se explica detenidamente en qué consisten cada uno de los pasos que se han llevado a cabo para conseguir la máxima energía producida.

### **1. Selección de datos de partida.**

Los datos de los que se parte inicialmente corresponden a los valores de irradiancia incidente sobre la superficie del generador con inclinación óptima ( $I$ , inclinación para la cual se maximiza la radiación incidente)  $15^\circ$ , temperatura ambiente ( $T_a$ ), velocidad del viento ( $V_v$ ) y temperatura de rocío ( $T_{\text{rocío}}$ ). Se trata de una estructura de acero galvanizado con un ángulo de inclinación y de orientación fijo. (Valero Ortega, 2011)

### **2. Asignación de una temperatura media del generador fotovoltaico a cada intervalo de irradiancia.**

La temperatura del panel se calcula con la expresión:

$$T_p = \frac{\frac{I}{2} + (2.8 + 3 \cdot V_v + 0.93 \cdot h_{RD}) \cdot T_a}{2.8 + 3 \cdot V_v + h_{RD}} \quad (\text{Cruz Fajardo, 2006}) \quad (6)$$

Donde  $I$  es la irradiancia sobre el plano de los módulos,  $V_v$  la velocidad del viento,  $T_a$  la temperatura ambiente y  $h_{RD}$  el coeficiente de radiación.

Para poder realizar su cálculo es necesario disponer previamente del valor en cada intervalo de irradiancia de las variables que intervienen:

- La irradiancia que se ha tomado en cada intervalo ha sido el valor medio en cada uno de ellos (por ejemplo, si el intervalo es de 0-50 W/m<sup>2</sup>, la irradiancia tomada es de 25 W/m<sup>2</sup>).
- La velocidad media del viento en cada intervalo se debe calcular de manera similar a la asignación de la temperatura ambiente media. El cálculo de ésta se realiza con la función “V<sub>viento.m</sub>”. Esta función parte igualmente de los valores de velocidad del viento para las 2160 horas de los tres meses, cada uno de los cuales lleva asociado un nivel de irradiancia. La función Vviento toma estos valores y los va asignando a cada intervalo, en función del nivel de irradiancia con el que se producen. A continuación se deben sumar, para cada intervalo, todos los valores de velocidad del viento que han sido asignados. Calculando la media aritmética de estos valores, resulta la velocidad del viento media en cada intervalo. Por último, destacar que la dirección del viento se debe considerar paralela al panel en todo momento.

### **3. Cálculo de la eficiencia del generador fotovoltaico por intervalos de tiempo.**

La eficiencia del generador fotovoltaico o campo solar depende fundamentalmente de la irradiancia incidente sobre el plano de los módulos, de la temperatura alcanzada por los mismos y de sus características eléctricas, como se ha visto en apartados anteriores.

Los pasos seguidos para este cálculo son:

- a) Seleccionar el tipo de módulo fotovoltaico que se emplea.

b) Especificar parámetros que no se aparecen en catálogos y cálculo de otros que condicionan la forma de la curva:

- $\alpha = 1,5 \text{ mA/}^\circ\text{C}$  (Variación de  $I_{cc}$  con la temperatura)
- $\beta = -2,3 \text{ mV/}^\circ\text{C}$  (Variación de  $V_{ca}$  con la temperatura)
- $\rho = 0,07$  (Reflectividad del vidrio del módulo)
- $\varepsilon = 0,9$  (Emisividad del módulo)
- $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  (Carga eléctrica del electrón)
- $K = 1,3866 \times 10^{-23}$  (Constante de Boltzmann)
- $m = 1,3$  (Factor de idealidad del diodo)
- Factor de forma

$$FF = \frac{P_{MAX}}{I_{cc} \cdot V_{ca}} \quad (\text{Cruz Fajardo, 2006}) \quad (7)$$

- Factor de forma máximo: se calcula suponiendo que la resistencia en serie es nula.

$$FF_0 = \frac{\frac{V_{ca}}{V_t} - \log\left(\frac{V_{ca}}{V_t} + 0.72\right)}{\frac{V_{ca}}{V_t} + 1} \quad (\text{Cruz Fajardo, 2006}) \quad (8)$$

- Resistencia en serie:

$$R_s = \left(1 - \left(\frac{FF}{FF_0}\right)\right) \cdot \left(\frac{V_{ca} \cdot I_{cc}}{NCS \cdot NCP}\right) \quad (\text{Cruz Fajardo, 2006}) \quad (9)$$

- Voltaje térmico

$$V_t = \frac{m \cdot K \cdot T}{e} \quad (\text{Cruz Fajardo, 2006}) \quad (10)$$

- Intensidad de cortocircuito para temperaturas e irradiancias diferentes de las condiciones estándar.

$$I_{cc-p} = \frac{I_{cc-1}}{100 + \alpha \cdot (T_p - 25) \cdot NCP} \quad (\text{Cruz Fajardo, 2006}) \quad (11)$$

- Tensión de circuito abierto para temperaturas e irradiancias diferentes de las condiciones estándar.

$$V_{ca\_p} = V_{ca} + \beta \cdot (T_p - 25) \cdot NCS + \frac{m \cdot k}{e \cdot (T_p + 273.15) \cdot \log(I/1000)} \cdot NCS$$

(Cruz Fajardo, 2006) (12)

- c) Determinación de la curva intensidad-tensión para las condiciones especificadas. Se realiza con la expresión:

$$V_{-p} = V_t \cdot \log \cdot \left( \frac{1 - I_{-p}}{I_{cc-p}} \right) + V_{ca\_p} - I_{-p} \cdot R_s \cdot \frac{NCS}{NCP}$$

(Cruz Fajardo, 2006) (13)

- d) La potencia proporcionada por el campo solar y el rendimiento del mismo en el punto de máxima potencia se determinan como:

$$P_{max} = \max(V_p \cdot I_p); n_{cs} = \frac{P_{max}}{I \cdot A_{panel}} \quad (\text{Cruz Fajardo, 2006}) \quad (14)$$

#### 4.- Sumatorio del comportamiento de la instalación por intervalos de irradiancia.

Sumando la energía eléctrica producida en cada intervalo de irradiancia se tiene la energía total producida por el campo solar que, por las hipótesis comentadas al inicio, coincide con la máxima energía de la instalación.

La energía producida en cada intervalo se calcula mediante el método de la utilizabilidad fotovoltaica ( $\Phi F$ ). El porcentaje de energía incidente disponible en cada intervalo  $[I_i, I_{i+1}]$  se calcula restando a la utilizabilidad del nivel de irradiancia inferior  $[I_i]$  la del inmediatamente superior  $[I_{i+1}]$ .

$$\text{Porcentaje}(I_i, I_{i+1}) = \Phi F(I_i) - \Phi F(I_{i+1}) \quad (\text{Cruz Fajardo, 2006}) \quad (15)$$

Aplicando la ecuación (6) se obtiene la energía producida en cada uno de los intervalos.

$$E_{\text{red}}(t_1 \cdot t_2) = A \cdot \sum_{t=t_1}^{t=t_2} \cdot \sum_{I_i=0}^{I_i=1000} (n_{cs}^-(I_i, I_{i+1}, T_{i,i+1}) \cdot H_t^\infty \cdot (\Phi F(I_i) - \Phi F(I_{i+1})) \cdot n_{inv}^-(I_i, I_{i+1}, T_{i,i+1}) \cdot n_p(I_i, I_{i+1}))$$

(Cruz Fajardo, 2006) (16)

Dónde:

- $n_{cs}^-(I_i, I_{i+1}, T_{i,i+1})$  es el rendimiento del campo solar en el nivel de irradiancia  $[I_i, I_{i+1}]$ , a la temperatura media en dicho periodo.
- $(\Phi F(I_i) - \Phi F(I_{i+1}))$  representa la utilizabilidad en el intervalo  $[I_i, I_{i+1}]$
- $n_{inv}^-(I_i, I_{i+1}, T_{i,i+1})$  es el rendimiento del inversor en el nivel de irradiancia  $[I_i, I_{i+1}]$ , que bajo las hipótesis consideradas es igual a la unidad.
- $n_p(I_i, I_{i+1})$  es un factor que engloba al resto de pérdidas ya comentadas susceptibles de producirse en una instalación fotovoltaica, en el intervalo  $[I_i, I_{i+1}]$  Por las hipótesis adoptadas en este apartado este término toma un valor igual a la unidad.

### 3.3. Energía realmente generada por una instalación.

La energía que una instalación fotovoltaica genera en realidad, es siempre inferior a la cantidad estimada en 3.2, donde únicamente se consideran las pérdidas ocasionadas por la variación de eficiencia con la temperatura del panel e irradiancia.

La consideración de todos los factores que influyen sobre la eficiencia de la instalación es determinante para estimar la verdadera producción futura de energía por parte de la misma. Las posibles pérdidas que pueden darse en una instalación fotovoltaica, además de las dos ya comentadas, son:

- Tolerancia respecto a valores nominales y dispersión de parámetros entre los módulos.
- Sombras proyectadas sobre el plano de los módulos.
- Polvo o suciedad acumulada sobre los módulos.
- Pérdidas por efecto Joule en cableado, interruptores, conexiones...
- El rendimiento del inversor no es la unidad. Un valor típico de la máxima eficiencia con la que éstos pueden funcionar es del 96%.
- Seguimiento del punto de la máxima potencia del generador fotovoltaico.
- Operaciones de mantenimiento.

Una vez conocidos los valores de estas ineficiencias, la producción de energía por la instalación se puede expresar, de manera general, como:

$$E_{red} = A \cdot H_t^\alpha \cdot n_{cs} \cdot n_{inv} \cdot n_p \quad (\text{Cruz Fajardo, 2006}) \quad (17)$$

Dónde:

- $E_{red}$  es la energía que se inyecta en la red.
- $A$  la superficie del generador.
- $H_t^\alpha$  es la radiación que recibe el generador, inclinado un ángulo  $\alpha$  para el cual se maximiza la energía incidente en un periodo de tiempo  $t$ , que se considera el año.
- $n_{cs}$  es el rendimiento del campo solar correspondiente a las condiciones de irradiancia y temperatura del panel para las que se calcula.
- $n_{inv}$  es el rendimiento del inversor.
- $n_p$  engloba el resto de pérdidas que pueden darse en una instalación.

## CAPÍTULO 4

### MODELACIÓN MATEMÁTICA Y ESTANDARIZACIÓN DEL EQUIPO

#### 4.1 Equipos empleados para el modelamiento

Para modelar el fenómeno de transformación de energía solar en energía eléctrica se dispone de los siguientes equipos:

- Dos paneles fotovoltaicos con capacidad a 25°C de 43W cada uno.



**Figura 14.** Paneles fotovoltaicos.

- Un data logger marca Ocean. En la industria es muy difundido el uso de transmisores que midan las variables de un proceso. (Quito Avila , 2005)



**Figura 15.**Data logger.

- Una estación meteorológica marca EasyWeather.



**Figura 16.**Estación meteorológica.

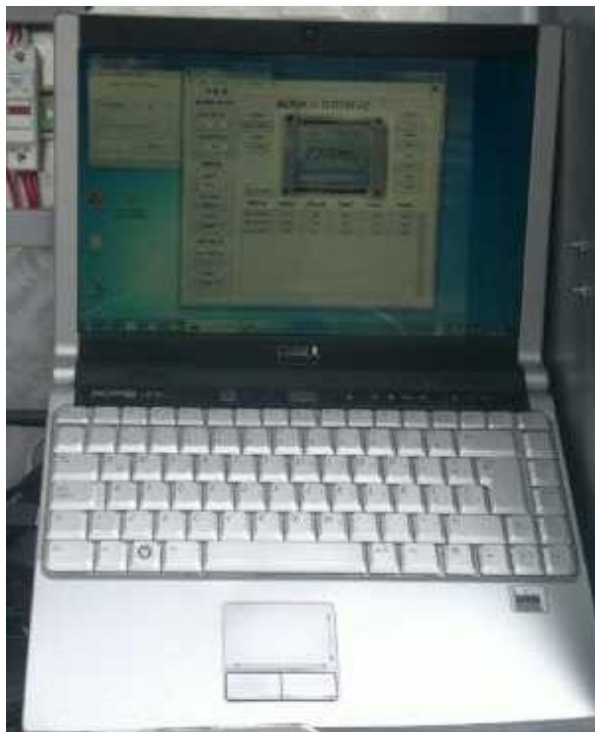
- Una fuente con respaldo para evitar la interrupción de adquisición de datos.



**Figura 17.**Fuente con respaldo de baterías.



- Un computador para almacenamiento de datos.



**Figura 18.** Computador para almacenamiento de datos.

El panel fotovoltaico tiene los datos de placa indicados en la tabla 2:

Tabla 2

Datos de placa para un panel fotovoltaico marca Arco Solar inc.

DATOS DEL PANEL a  $1000\text{W}/\text{m}^2$

AREA DEL PANEL descontando marco de aluminio	0.3255	$\text{m}^2$
POTENCIA PROMEDIO A $25^\circ\text{C}$	43	W
MAXIMO AMPERAJE A $47^\circ\text{C}$ EN CORTOCIRCUITO	3.68	A
MAXIMO VOLTAJE A $0^\circ\text{C}$ EN CIRCUITO ABIERTO	20	VDC
MAXIMA POTENCIA A $47^\circ\text{C}$ = (P $_{47^\circ\text{C}}$ )	41.7	W
VOLTAJE A $47^\circ\text{C}$	12.8	VDC
CORRIENTE A $47^\circ\text{C}$	3.26	A

El equipo Data logger obtendrá valores de, voltaje (V), corriente (I), irradiancia (I) y temperatura del panel ( $T_p$ ) mediante el programa Mosbus, ver anexo 1 para el manual de usuario. El equipo EasyWeather obtiene el valor de la temperatura ambiente, en el anexo 2 se presenta el manual de usuario.

Los datos obtenidos cada cinco minutos tanto del data logger y del EasyWeather se recopilan manualmente en una hoja de Excel.

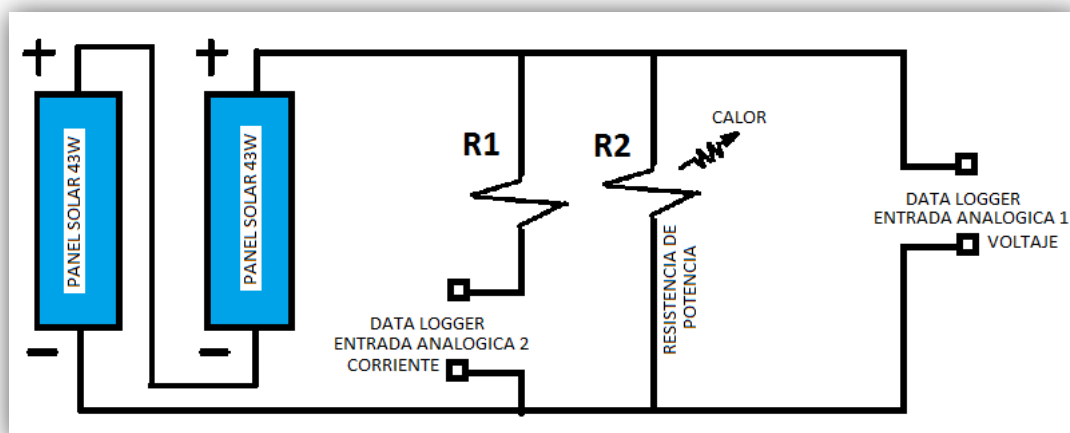
El data logger Ocean soporta máximo 30 Voltios en la entrada analógica 1 y máximo 20 miliamperios en la entrada analógica 2.

Para el estudio planteado en esta tesis los dos paneles se conectarán en serie entregando máximo 25.6 V y 3.26 A, según los datos de placa de cada panel fotovoltaico.

Tomando en cuenta que para una investigación futura se conectarán los dos paneles en paralelo se calculan las resistencias R1 y R2 de tal manera que el data logger Ocean pueda adquirir datos de los dos paneles conectados sea en serie o en paralelo sin ningún inconveniente.

La resistencia R2 tiene que ser puramente resistiva para garantizar la disipación de la potencia en forma de calor, por lo que se escogen resistencias de cerámica, como se muestra en la figura 19, que disipan hasta 1000 W, notar que los paneles fotovoltaicos generarán máximo 86 W.

La resistencia R1 manejará corrientes inferiores a 20 miliamperios por lo que no es necesaria una resistencia de potencia.



**Figura 19.** Diagrama de conexiones a realizar en las entradas analógicas 1 y 2.

Para calcular el valor de la resistencia se basa en la ley de OHM, ecuación 18, considerar los valores máximos de voltaje y corriente del panel.

$$\begin{aligned}
 V_1 &= V_2 = (12.8 * 2) = 25.6 \text{ V} \\
 V_2 &= I_2 * R_2 \\
 I_1 * R_1 &= I_2 * R_2 \\
 R_2 &= \frac{V_2}{I_2} = \frac{2 * 12.8}{3.26} = 7.85 \Omega
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Se sueldan en paralelo 10 resistencias de potencia dando una resistencia equivalente real de  $10,5 \Omega$  como se puede ratificar en la figura 20 mediante un multímetro digital.

$$R_{2 \text{ real}} = 10.5 \Omega$$



**Figura 20.** Resistencia  $R_2$  real medido con un milímetro digital.

Se procede a recalculer la resistencia  $R_1$ . Previo a este cálculo se realiza una regla de tres simple para calcular la corriente  $I_1$ . Considerar que 20 miliamperios en la resistencia  $R_1$  reflejarán 10 amperios en la resistencia  $R_2$ , entonces se tiene:

$$I_{\text{max del panel}} = 3,26 \text{ A}$$

$$I_{\text{max de entrada data logger}} = 0,02 \text{ A}$$

$$I_{\text{max que pasa por } R_2} = 10 \text{ A}$$

Usando una regla de tres simple se conoce cuanto corriente pasa por  $R_1$  cuando en  $R_2$  pasa una corriente de 3,26 A considerando que el rango de corriente que soporta el data logger es de 0 a 0.02 A.

$$I_1 = \frac{3.26 * 0.02}{10} = 0.00652 \text{ A}$$

El rango que manejará el data logger en la entrada analógica 2 es de 0 a 0.00652 A cuando se encuentren los dos paneles fotovoltaicos conectados en serie.

Con los datos de corriente  $I_1$  y resistencia  $R_{2 \text{ real}}$  se procede como sigue para calcular la  $R_{1 \text{ real}}$

$$V_1 = V_2$$

$$I_1 * R_1 = I_2 * R_2$$

$$R_{1 \text{ real}} = \frac{I_2 * R_{2 \text{ real}}}{I_1}$$

$$R_{1 \text{ real}} = \frac{3.26 * 10.5}{0.00652}$$

$$R_{1 \text{ real}} = 5250 \Omega$$

Se coloca una resistencia de:

$$R_{1 \text{ real}} = 5.2 \text{ k} \Omega.$$

Con estos valores de resistencia  $R_1$  y  $R_2$  podemos empezar a almacenar datos cada 5 minutos de la potencia real del panel fotovoltaico.

#### **4.2 Procesamiento de datos.**

Para el presente proyecto se ha considerado que se almacenarán datos de tres meses cada cinco minutos dando un total de 25920 datos.

La irradiancia ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) y la temperatura del panel se adquieren directamente de sensores independientes que permite almacenar conjuntamente con los datos de voltaje y corriente de los paneles en el mismo data logger.

La ecuación 19 permite obtener la irradiancia ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) en función de la temperatura ambiente y la temperatura del panel.

$$I = \frac{T_p - T_a}{T_{ONC} - 20} * 800 \quad (\text{Cruz, 2014}) \quad (19)$$

Donde:

- $T_p$ : temperatura del panel ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_a$ : temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $I$ : irradiancia ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $T_{ONC}$  : temperatura de operación nominal de la célula ( $^{\circ}\text{C}$ ).

El valor obtenido con la ecuación 19 es inexacto por lo que solo sirve para tener una ligera idea de cuanta irradiancia se tiene, la razón es que el panel depende de otras variables como la velocidad del viento provocando enfriamiento, polvo que se asienta en la superficie del panel, inclinación del panel, etc.

Pérdidas por polvo o suciedad originan la disminución de la potencia de un generador fotovoltaico, cabría destacar dos aspectos, por un lado la presencia de una suciedad uniforme da lugar a una disminución de la corriente y tensión entregada por el generador fotovoltaico y por otro lado la presencia de suciedades localizadas (como puede ser el caso de excrementos de aves) da lugar a un aumento de las pérdidas de mismatch. (Fernández Ferichola, 2008)

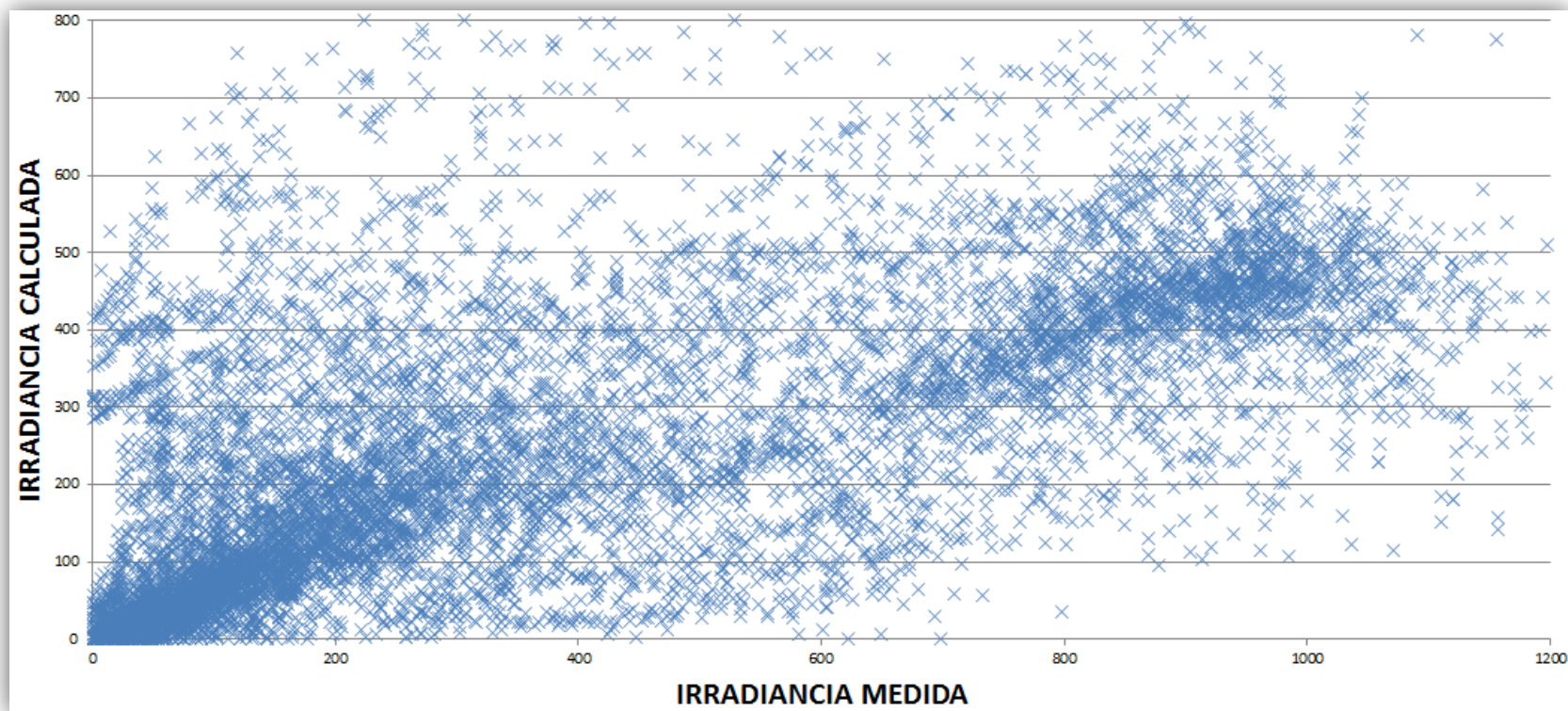
En la columna N, de la tabla 3, se aplica la ecuación 19.

Tabla 3

Cálculos realizados en función de la ecuación 19.

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
<b>DATOS DEL PANEL a 1000W/m2</b>									<b>PROMEDIO DE EFICIENCIA "<math>\eta_p</math>" (P/Ps)</b>		10,03	
AREA DE LOS DOS PANELES descontando marco						0,651 m2			EFICIENCIA dato fabricante (43*100/(1000*0.325))		13,21	
POTENCIA PROMEDIO A 25°C						43 W			DESVIACION ESTANDAR		2,9951245	
MAXIMO AMPERAJE A 47°C EN CORTOCIRCUITO						3,68 A			Promedio de Irradiancia (W/m2)		489,27	
MAXIMO VOLTAJE A 0°C EN CIRCUITO ABIERTO						20 VDC			# DE DATOS EN 6 MESES		51840	
MAXIMA POTENCIA A 47°C = (P47°C)						41,7 W			kWh/m2/dia		4,02	
VOLTAJE A 47°C						12,8 VDC						
CORRIENTE A 47°C						3,26 A						
FECHA	HORA	SENSOR IRRADI ANCIA W/m <sup>2</sup>	TEMP PANEL X 10 (°C)	V (V)	I (A)	TEMP PANEL (°C)	POTENCIA P (W)=V*I	POTENCIA DEL SENSOR IRRADIANCIA SOLAR Ps (W)	EFICIENCIA " $\eta$ " = P/Ps	DISTRIBUCION NORMAL	TEMP AMBIEN T (°C)	IRRADIAN CIA f(T)
13/12/2013	12:15:00	985	356	27,01	2,42	35,6	65,3642	641,235	10,19348601	0,133002418	20,2	456,30
13/12/2013	12:20:00	1038	387	26,86	2,41	38,7	64,7326	675,738	9,579541183	0,131689782	20,2	548,15
13/12/2013	12:25:00	1043	430	26,51	2,39	43	63,3589	678,993	9,331303857	0,129607373	20,1	678,52
13/12/2013	12:30:00	445	457	17,21	1,54	45,7	26,5034	289,695	9,148725384	0,127536447	20,2	755,56
13/12/2013	12:35:00	131	366	5,22	0,46	36,6	2,4012	85,281	2,815633025	0,007313699	20,2	485,93
13/12/2013	12:40:00	116	298	4,43	0,38	29,8	1,6834	75,516	2,229196462	0,004476627	20,3	281,48
13/12/2013	12:45:00	61	275	2,49	0,22	27,5	0,5478	39,711	1,379466647	0,002053574	20,5	207,41
13/12/2013	12:50:00	965	254	29,33	2,64	25,4	77,4312	628,215	12,32558917	0,099333391	20,4	148,15
13/12/2013	12:55:00	167	295	6,51	0,58	29,5	3,7758	108,717	3,473053892	0,012115289	20,3	272,59
13/12/2013	13:00:00	156	281	6,1	0,54	28,1	3,294	101,556	3,243530663	0,010213714	20,3	231,11
13/12/2013	13:05:00	179	263	6,92	0,61	26,3	4,2212	116,529	3,622445915	0,013496661	20,2	180,74
13/12/2013	13:10:00	948	300	28,3	2,54	30	71,882	617,148	11,64744923	0,115154541	20,1	293,33

Al graficar la irradiancia calculada por medio de la ecuación 19 en función de la irradiancia medida se obtiene la figura 21.



**Figura 21.** Irradiancia calculada en función de la irradiancia medida.



En la figura 21 obtenemos datos muy dispersos que difícilmente forman una recta que garantice una relación directa entre la irradiancia en función de la temperatura ambiente y la temperatura del panel.

Con este análisis se ratifica que la ecuación 19 solo sirve para tener una ligera idea del valor de irradiancia.

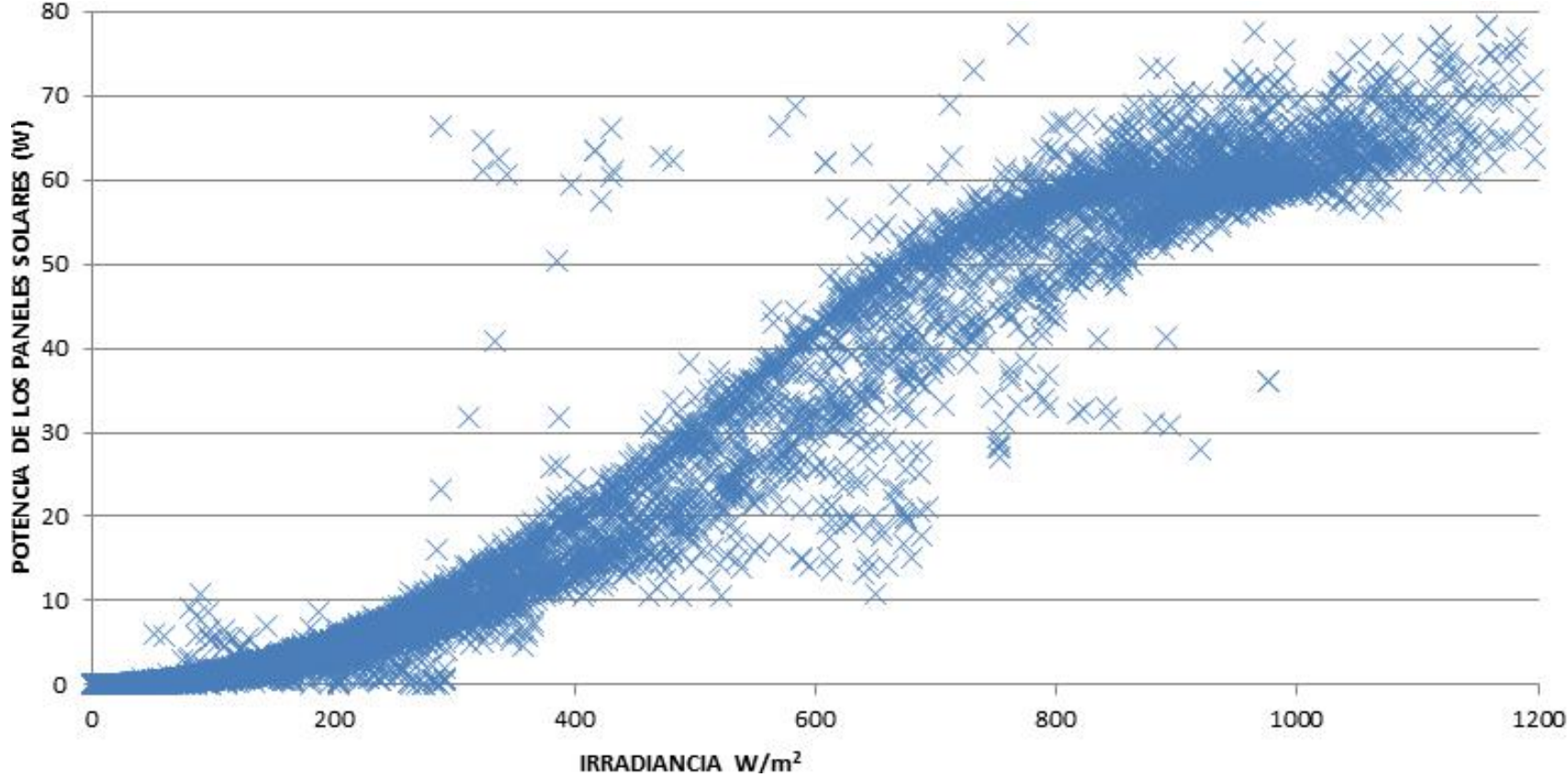
En la figura 22 se grafica la potencia obtenida multiplicando el voltaje por la corriente almacenados en función de la irradiancia medida con el sensor. Analizando esta gráfica parece tener una semejanza con el lazo de histéresis formado en la magnetización de los transformadores, además los datos comprendidos entre cero y  $400 \text{ W/m}^2$  no tienen un comportamiento lineal.

Esto se debe a que los mismos datos se obtienen hasta aproximadamente a las 8:00 de la mañana donde los rayos solares todavía no tienen un ángulo significativo para incidir en los paneles fotovoltaicos, sumado a esto la apreciación de los aparatos de medición, se podría adquirir datos erróneos, por lo que para efectos de estudio se los ha descartado.

El problema se corrige construyendo un panel fotovoltaico que siga la trayectoria del sol.

Con el dato de energía obtenido en la tabla 3 calculamos el tiempo necesario para recuperar la inversión de un panel fotovoltaico considerando un precio de despacho de  $\$0,12/\text{kWh}$  en el mercado eléctrico mayorista del Ecuador.

$$\$(2 * 800) * \text{panel} * \frac{\text{kWh}}{\$0,12} * \frac{\text{m}^2 * \text{día}}{4.02 \text{ kWh}} * \frac{1}{0,651 \text{ m}^2} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \approx 14 \text{ años.}$$



**Figura 22.** Sensor de potencia (V\*I) en función de la Irradiancia

En la figura 22 se observa que una gran cantidad de datos, dentro del rango de 400 a 800 W/m<sup>2</sup>, se comportan como una recta, para formar la ecuación primero se obtiene gráficamente los valores de la tabla 4.

Tabla 4

Valores de X y Y obtenidos gráficamente de la figura 22.

	X	Y
1	400	15
2	800	55

Donde Y es la potencia en vatios del panel y X la irradiancia en W/m<sup>2</sup>.  
En la ecuación 20 se indica la ecuación general de la recta.

$$Y_2 - Y_1 = m * (X_2 - X_1) \quad (20)$$

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

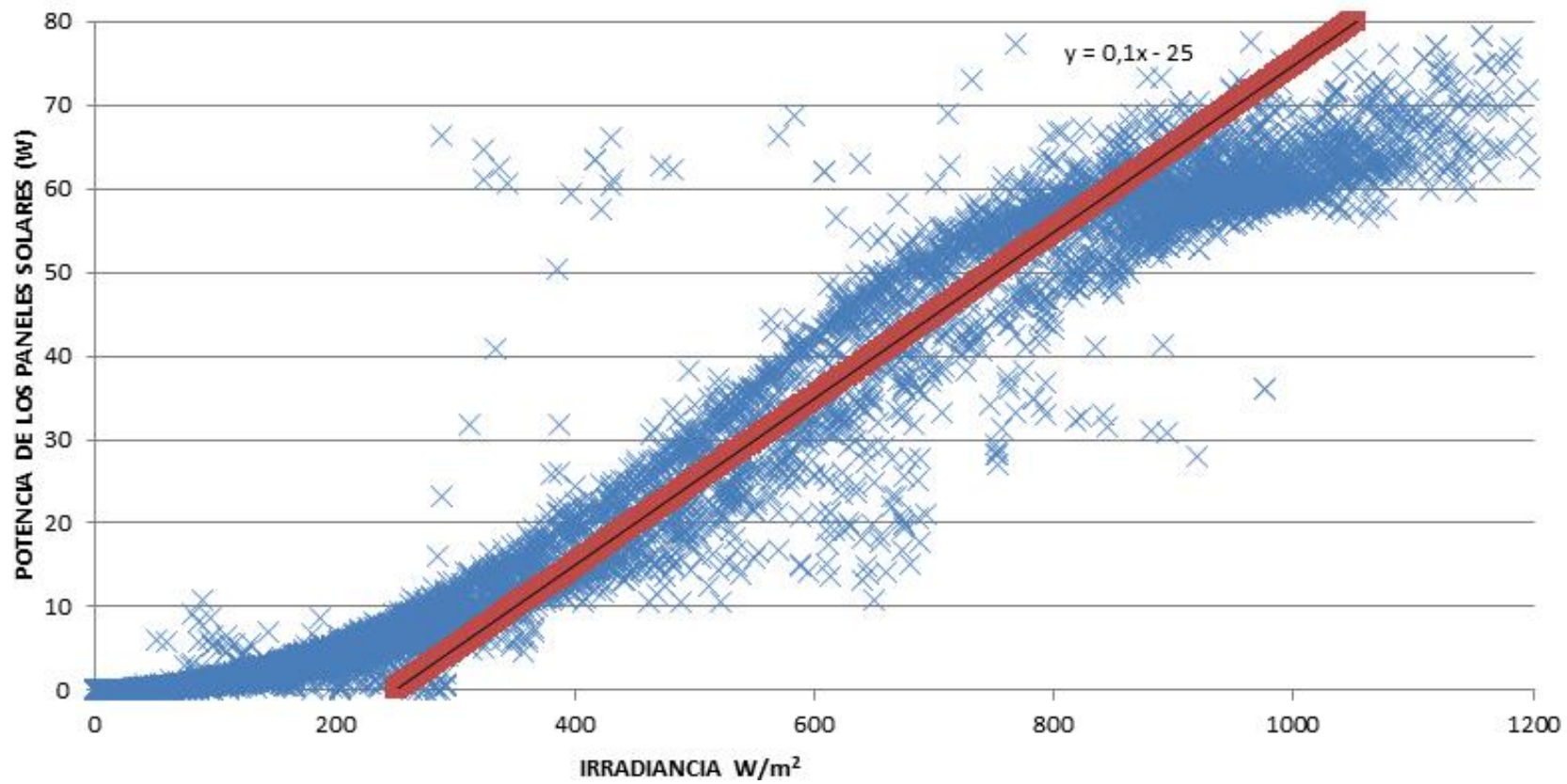
$$m = \frac{55 - 15}{800 - 400}$$

$$m = 0.1$$

$$Y - 15 = 0.1 * (X - 400)$$

$$Y = 0.1 * X - 25 \quad (21)$$

La ecuación 21 se presenta en la figura 23.



**Figura 23.** Línea de tendencia para potencia en función de la irradiancia en un rango de 400 a 800 W/m<sup>2</sup>.

Usando la ecuación 21 se calcula el límite de la eficiencia para evitar datos erróneos.

$$P = Y = 0.1 * 400 - 25$$

$$P = 15 \text{ W}$$

$$P_S = 400 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0.651 \text{m}^2$$

$$P_S = 260.4 \text{ W}$$

$$\eta_e = \frac{P}{P_S} = \frac{15}{260.4} * 100\%$$

$$\eta_e = 5.7\%$$

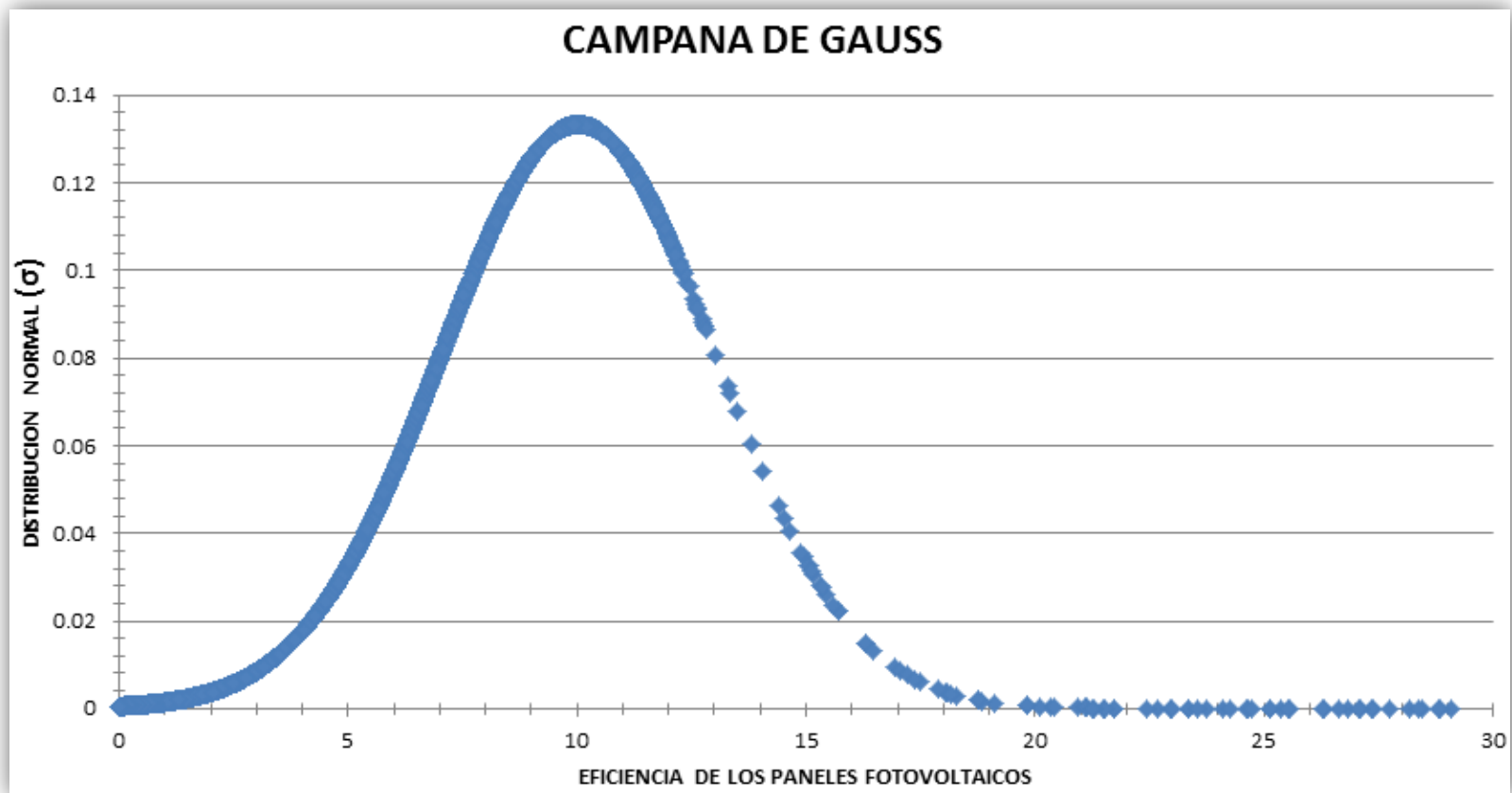
Donde:

- $P_S$  =Potencia del sensor de irradiancia
- $P$  =Potencia del panel
- $\eta_e$  = límite de eficiencia del panel fotovoltaico para minimizar los datos erróneos.

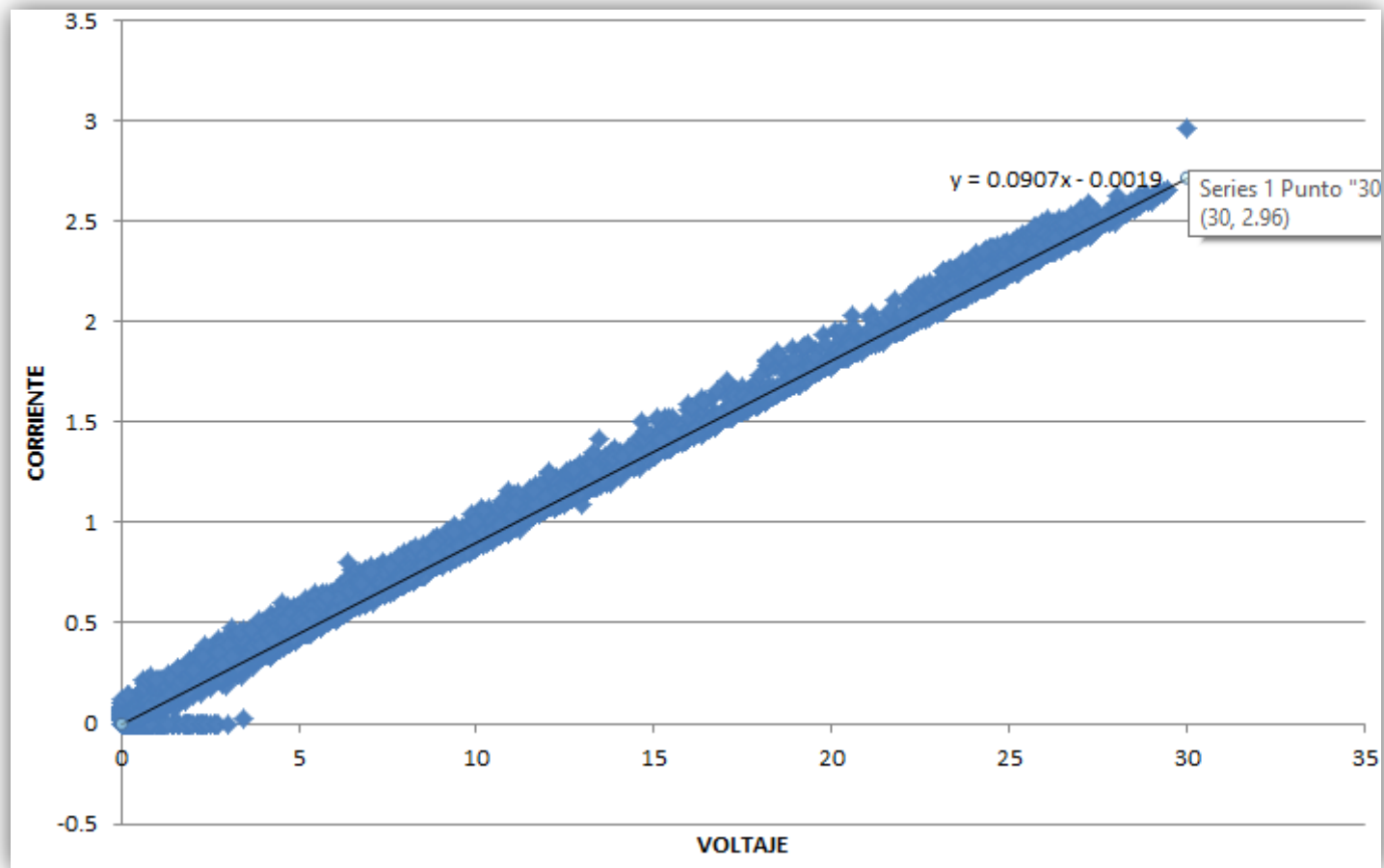
Considerando las aclaraciones anteriores se aprecia en la tabla 3 lo siguiente:

- Promedio de eficiencia de los paneles de 10.03%
- Energía por metro cuadrado en un día 4.02 kWh/m<sup>2</sup>/día.
- Irradiancia promedio en el sector 489 W/m<sup>2</sup>.

Al graficar los datos con una distribución normal se forma en la figura 24 una campana de gauss, donde se observa la mayoría de datos distribuidos alrededor del promedio que es 10.03% de eficiencia con una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 2.99.



**Figura 24.** Campana de Gauss.



**Figura 25.** Representación gráfica de la corriente en función del voltaje de los paneles fotovoltaicos.

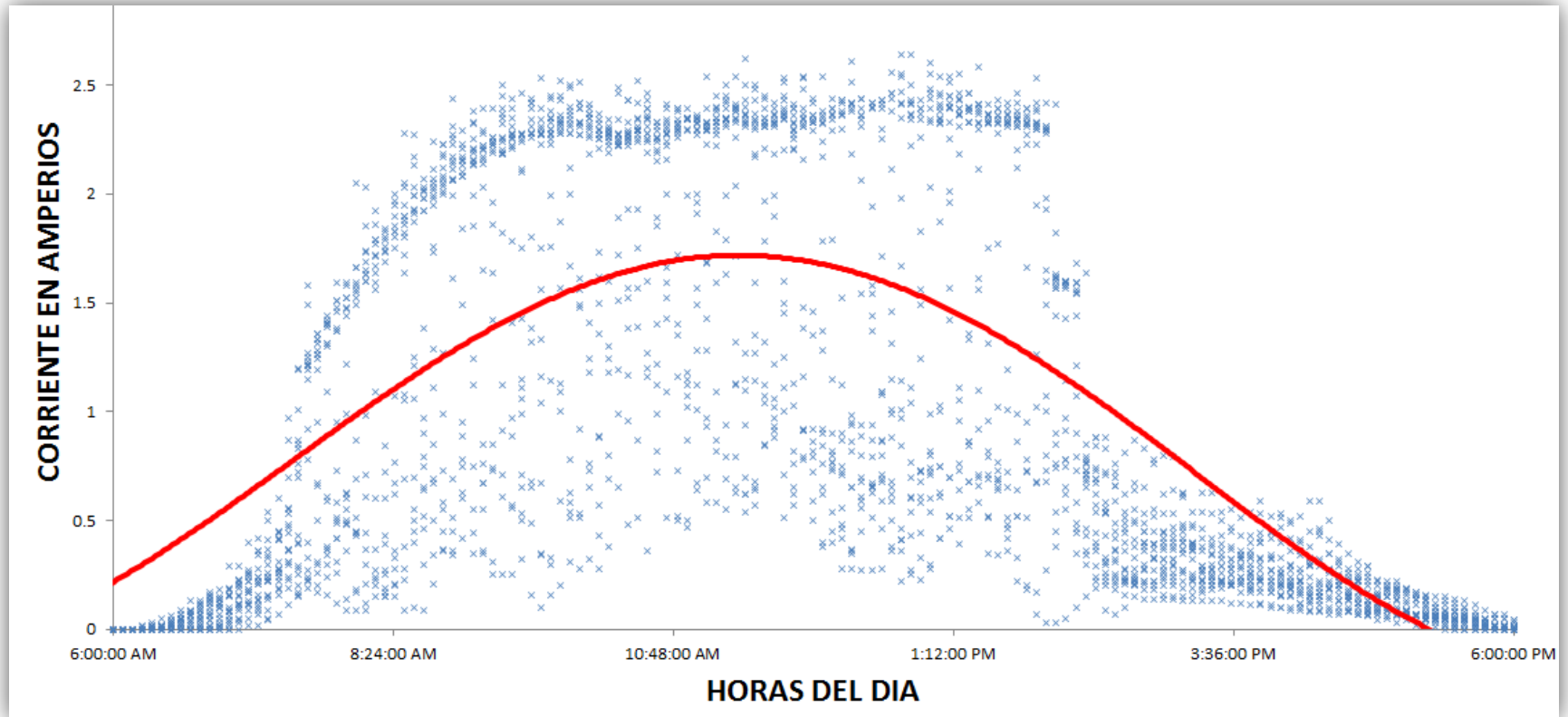
Con los datos de voltaje y corriente obtenemos una recta cuya pendiente es la resistencia de  $10.5 \Omega$  como se aprecia en la figura 25

En Ecuador todos los años tenemos relativamente el mismo clima por lo que obteniendo las curvas características de corriente diaria se puede estimar con claridad la tendencia de energía a obtener con los paneles fotovoltaicos.

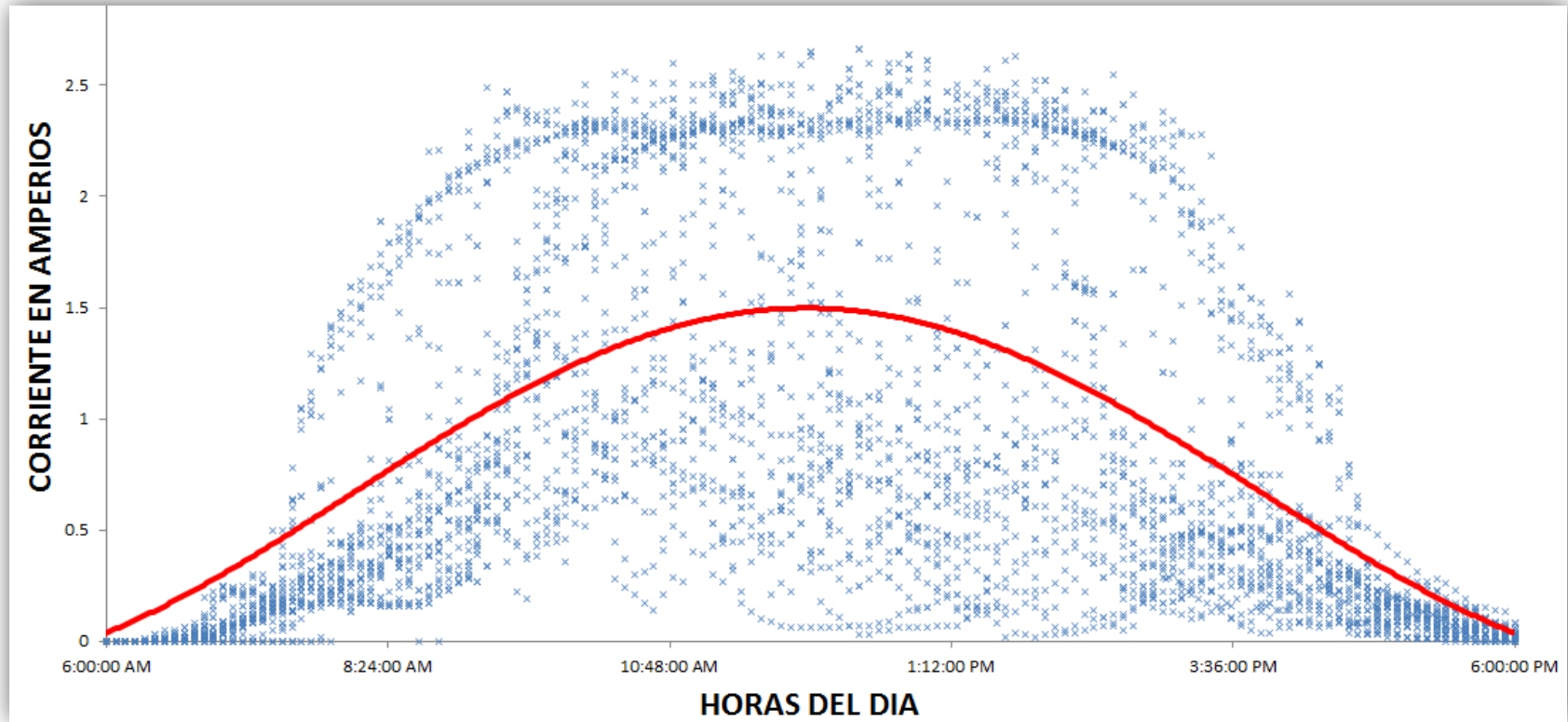
Este fenómeno se aprecia en las figuras 26, 27, 28 y 29 donde se indica en línea roja el promedio de los días del mes tomados cada cinco minutos.

Al comparar los gráficos mensuales notamos que a pesar que cada mes tiene su tendencia particular, siempre se darán valores de corriente muy cercanos a 2.5 amperios.

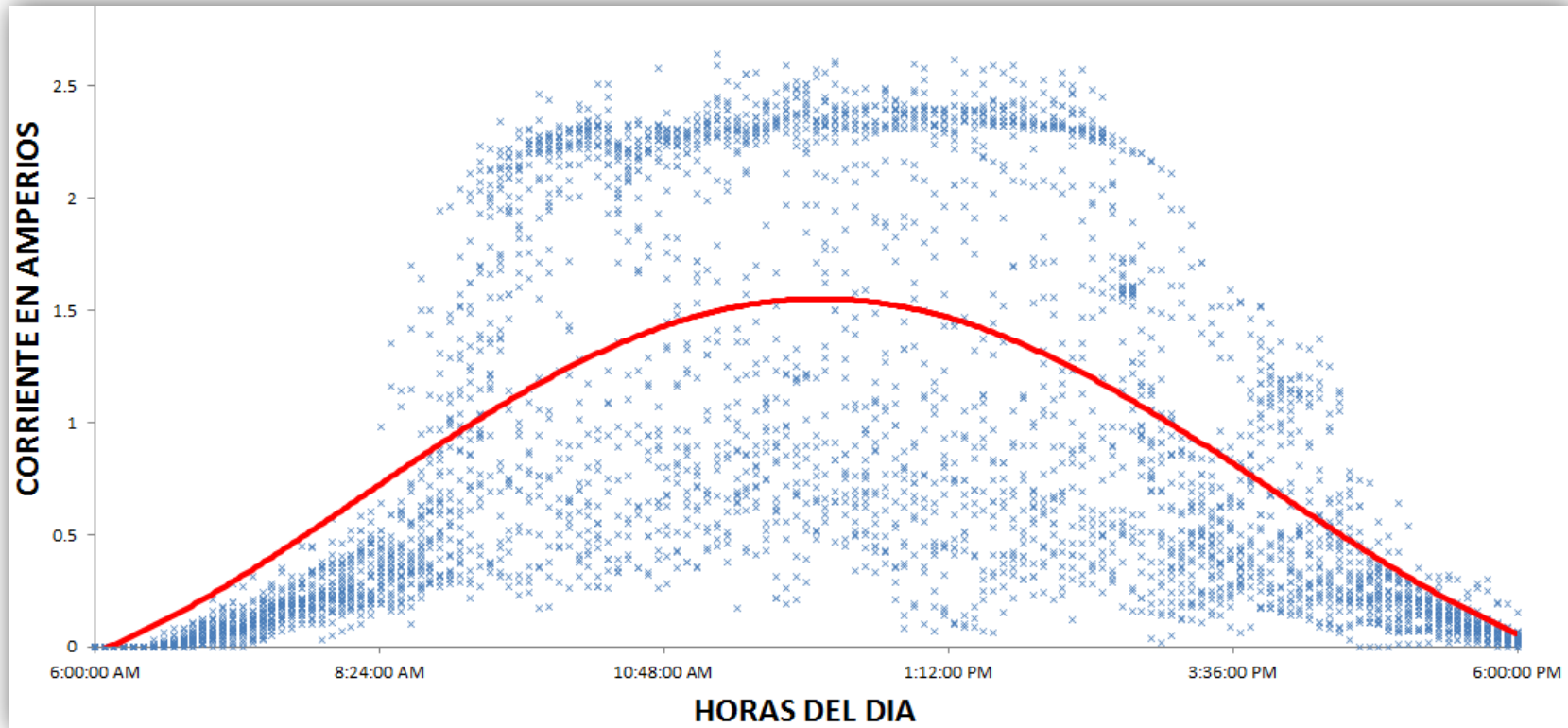




**Figura 26.** Corriente en función de las horas del día en el mes de Diciembre del 2013.



**Figura 27.** Corriente en función de las horas del día en el mes de Enero del 2014.



**Figura 28.** Corriente en función de las horas del día en el mes de Febrero del 2014.

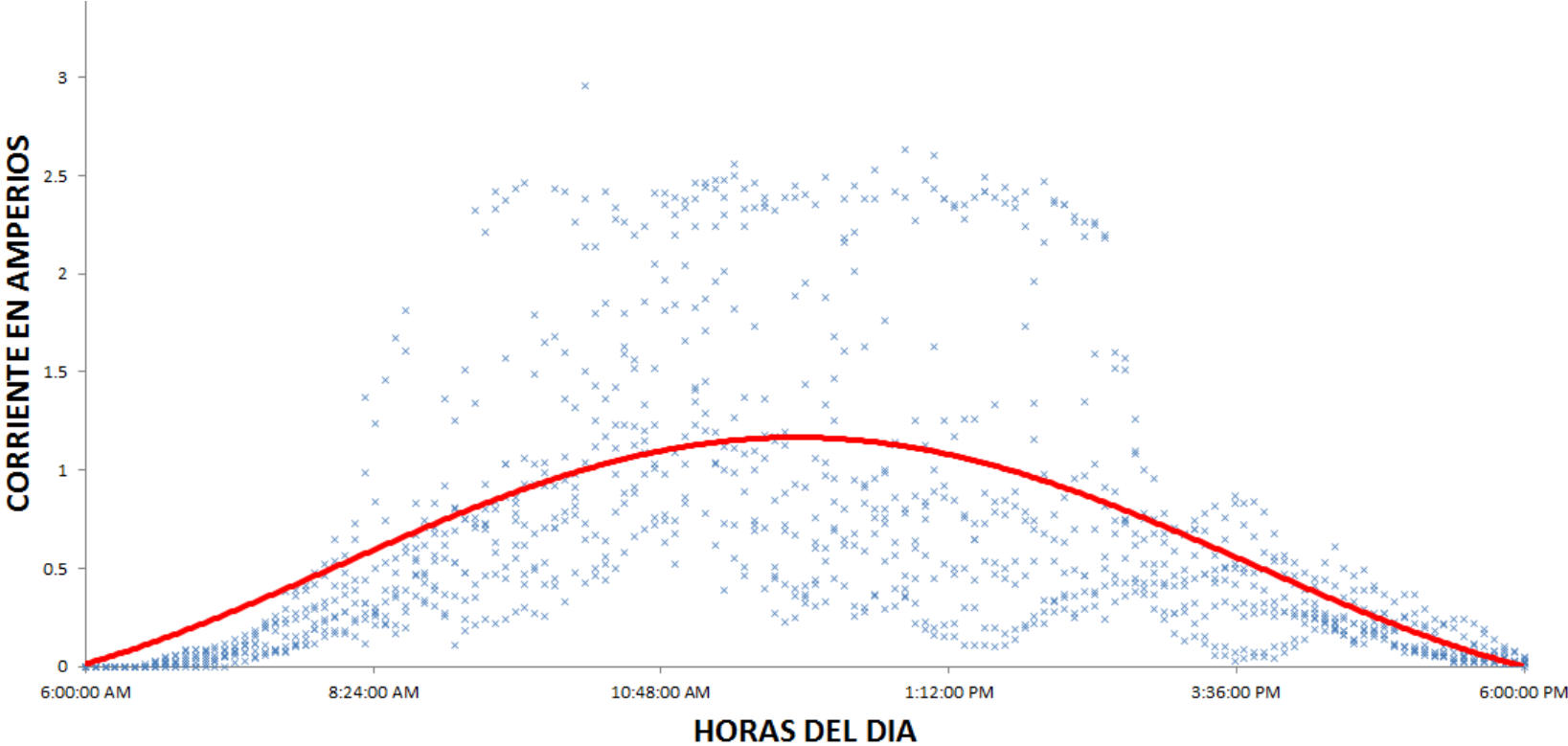


Figura 29. Corriente en función de las horas del día en el mes de Marzo del 2014.

Para obtener la curva característica del panel fotovoltaico en fábrica se realiza en ambiente controlado y con una resistencia variable. Para el caso de estudio hay que considerar la variación tanto de temperatura como de irradiancia.

Para obtener las curvas características de los paneles fotovoltaicos conectados en serie se toman para cada una de las irradiancias cuatro datos de voltaje:

1. Circuito abierto.
2. Resistencia de 10.5 ohmios.
3. Resistencia de 5.43 ohmios.
4. Corto circuito.

$$R_{2 \text{ real}} = 10.5 \Omega$$

Para variar la resistencia de potencia se dispone de una resistencia de  $R_{2 \text{ real}} = 5.43 \Omega$  por lo que es necesario recalcular la resistencia  $R_1$  de la figura 19. De la ecuación 18 obtenemos la corriente  $I_2$ .

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{2 * 12.8}{5.43} = 4.71 \text{ A}$$

Previo a los siguientes cálculos se realiza una regla de tres simple para calcular la corriente  $I_1$ . Considerar que 20 miliamperios en la resistencia  $R_1$  reflejarán 10 amperios en la resistencia  $R_2$ , entonces se tiene:

- $I_{\text{max del panel}} = 4.71 \text{ A}$
- $I_{\text{max de entrada data logger}} = 0,02 \text{ A}$

$$- I_{\text{max que pasapor } R_2} = 10 \text{ A}$$

Usando una regla de tres simple se conoce cuanta corriente pasa por  $R_1$  cuando en  $R_2$  pasa una corriente de 4.71 A considerando que el rango de corriente que soporta el data logger es de 0 a 0.02 A.

$$I_1 = \frac{4.71 * 0.02}{10} = 0.00942 \text{ A}$$

El rango que manejará el data logger en la entrada analógica 2 es de 0 a 0.00942 A cuando se encuentren los dos paneles fotovoltaicos conectados en serie.

Con los datos de corriente  $I_1$  y resistencia  $R_{2 \text{ real}}$  se procede como sigue para calcular la  $R_{1 \text{ real}}$

$$V_1 = V_2$$

$$I_1 * R_1 = I_2 * R_2$$

$$R_{1 \text{ real}} = \frac{I_2 * R_{2 \text{ real}}}{I_1}$$

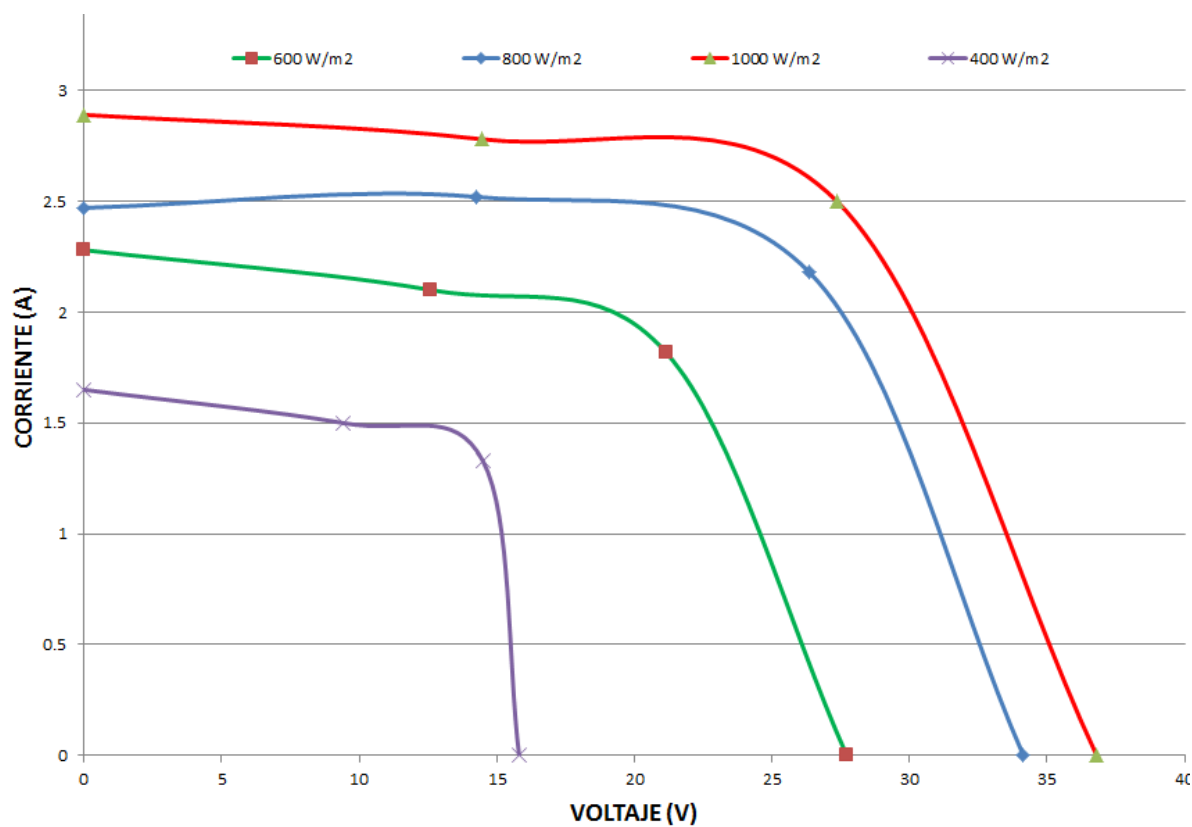
$$R_{1 \text{ real}} = \frac{25.6}{0.00942}$$

$$R_{1 \text{ real}} = 2685 \Omega$$

Se coloca una resistencia de:

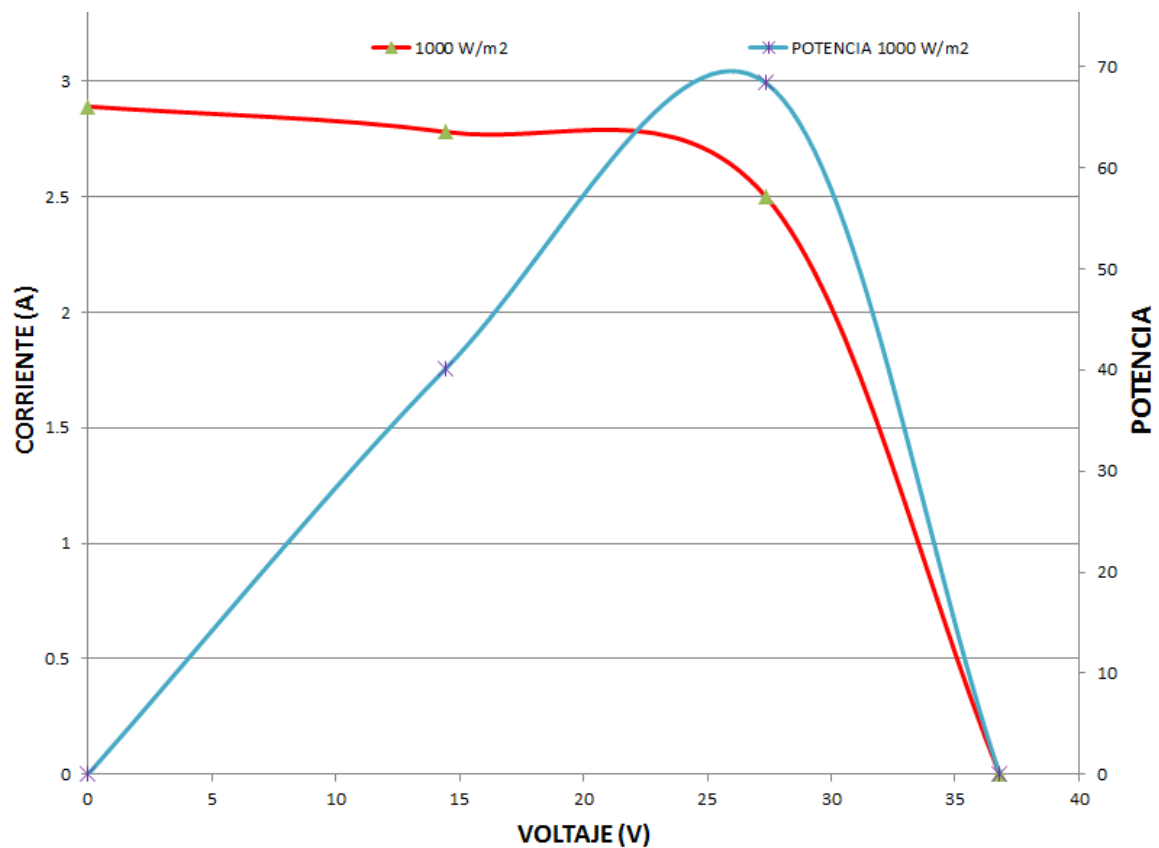
$$R_{1 \text{ real}} = 2.7 \text{ k} \Omega.$$

Con los datos obtenidos de voltaje y corriente variando la resistencia en cuatro pasos, obtenemos la figura 30.



**Figura 30.** Corriente en función del voltaje tomando en cuenta una resistencia variable.

Como no se dispone de un ambiente controlado se nota en la figura 30 curvas no homogéneas, pero da una idea clara del funcionamiento del panel fotovoltaico a diferentes irradiancias.



**Figura 31.** Curva característica de los dos paneles fotovoltaicos conectados en serie.

En la figura 31 se muestra, para una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ , la corriente y la potencia en función del voltaje.



## Capítulo 5

### FUNCIONAMIENTO Y COSTOS DEL EQUIPO

#### 5.1 COSTOS DE EQUIPOS Y MATERIALES PARA LA INVESTIGACIÓN

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO [USD]	COSTO TOTAL [USD]
PANEL FOTOVOLTAICO	2	430	860
EQUIPO DE ADQUISICION DE DATOS	1	2100	2100
JUEGO DE SENSORES	1	1500	1500
		<b>TOTAL</b>	<b>4460</b>

#### 5.2 COSTOS DEL PERSONAL DE INVESTIGACIÓN

NOMBRE	CARGO	TIEMPO [HORAS]	VALOR [USD/HORA]	TOTAL [USD]
MSC. Ing. JoseGuasumba	Tutor 1	24	25	600
Ing. Patricio Neto	Ejecutor	200	8	1600
Ing. Jorge Villacis	Ejecutor	200	8	1600
			<b>TOTAL</b>	<b>3800</b>

#### 5.3 MISCELÁNEOS

DESCRIPCIÓN	COSTO [USD]
ÚTILES DE OFICINA	20
TRANSPORTE	100
SERVICIOS BÁSICOS	60
IMPRESIONES	80
COPIADOS DE TEXTOS	40
VARIOS	80
<b>TOTAL</b>	<b>380</b>

#### 5.4 RESUMEN DE COSTOS

DESCRIPCIÓN	COSTO [USD]
COSTOS DE EQUIPOS Y MATERIALES PARA LA INVESTIGACIÓN	4460
COSTOS DEL PERSONAL DE INVESTIGACIÓN	3800
MISCELÁNEOS	380
SUBTOTAL	8640
IMPREVISTOS (3%)	259,20
TOTAL	8899,20

## Capítulo 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

- La eficiencia promedio del panel en los cuatro meses de estudio es 10.03% que difiere del 12,81% dado por el fabricante, esta diferencia se debe a variables como temperatura del panel, temperatura ambiente, polvo en el panel fotovoltaico que intervienen en el estudio. Con variables similares a las usadas por el fabricante en ambiente controlado tenemos que a una temperatura ambiente de 20,4°C con una radiación de 965W/m<sup>2</sup> la eficiencia del panel es 12,33%.
- La energía promedio que produce el panel fotovoltaico es 4,02 kWh/m<sup>2</sup>/día, la irradiancia promedio obtenida por datos del sensor solar en Quito y sus alrededores es de 489 W/m<sup>2</sup>.
- El registro continuo de datos, cada 5 minutos, facilita el análisis del comportamiento del panel fotovoltaico, descartando errores de lectura para comparar un modelo estadístico con un modelo físico. A pesar de esta ventaja se observa que los parámetros varían considerablemente cada segundo.
- Con las políticas actuales referentes al mercado de generación eléctrica, la recuperación de la inversión de una central fotovoltaica está por encima de los 14 años, lo cual desde el punto de vista financiero aun no es rentable para inversiones privadas a gran escala.
- La inversión en generación eléctrica fotovoltaica de momento únicamente se justificaría en el aporte social para el desarrollo de familias y comunidades alejadas geográficamente de fuentes de energía convencionales, como es el caso de las comunidades radicadas en la amazonia ecuatoriana

## 4.2 Recomendaciones

- En estudios futuros se recomienda analizar la eficiencia del panel en ambientes controlados, sin incidencia de polvo o cambios de temperatura que afectan los resultados.
- Se recomienda poner un panel fotovoltaico a una inclinación de  $15^\circ$  orientado hacia el norte para evitar la acumulación de partículas de polvo y aumentar la eficiencia del panel.
- Las partículas de polvo se depositan en el panel fotovoltaico por lo que es necesario mínimo cada mes realizar una limpieza con agua jabonosa para mantener la eficiencia de los paneles
- Para evitar los problemas que conllevan el uso de baterías para almacenar la energía producida por el panel fotovoltaico se recomienda que el panel fotovoltaico se conecte directamente a la red de la empresa eléctrica.
- Se recomienda realizar un estudio futuro con los paneles conectados en paralelo.
- Considerar que los resultados de esta investigación están restringidos a tres meses. Para tener datos más precisos se recomienda extender el estudio a 5 años.
- Aterrizar todas las partes metálicas de la instalación fotovoltaica, recordar que si a una persona le circula 0,05 A puede sufrir daños, en nuestro caso estamos trabajando con corrientes de hasta 3 amperios que son muy peligrosas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lamaison, R. (2009). *Energía Solar Fotovoltaica*.
- [www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/estaciones-meteorologicas](http://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/estaciones-meteorologicas). (Diciembre de 2013).
- Camargo Carvajal, J. E., & Dallos Castellanos, Á. A. (2011). *EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA*. Bucaramanga.
- Chavéz Guerrero, M. (2012). *Proyecto de Factibilidad de uso de Paneles Solares en Generación Fotovoltaica*. Riobamba.
- CONELEC. (18 de Diciembre de 2009). <http://www.conelec.gov.ec/downloads/Atlas.pdf>. Recuperado el Enero de 2014
- Cruz Fajardo, E. (2006). *CRITERIO DE VALORACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS*. Sevilla: UNIVERSIDAD DE SEVILLA.
- Cruz, E. (2014). *Criterio de Valoración del Comportamiento de Instalaciones Fotovoltaicas*.
- Fernández Ferichola, J. (2008). *Caracterización de Módulos Fotovoltaicos con Dispositivo Portátil*. Madrid.
- Grassi, F., & Ansaldi, J. (2012). *Diseño de un Seguidor Solar de Dos Ejes Parametrizado por PC*. Uruguay.
- Herrera Medina, J., & Molina Palma, N. (2010). *DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA SEGUIMIENTO SOLAR EN DOS EJES*. El Salvador.
- INAMHI. (Noviembre de 2013). [www.serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca/](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca/).
- INAMHI. (Junio de 2013). [www.serviciometeorologico.gob.ec/red-de-estaciones-meteorologicas/](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/red-de-estaciones-meteorologicas/). Recuperado el Marzo de 2014
- Jaramillo Salgado, O. (2008). *Transporte de Energía Solar Concentrada a través de Fibras Ópticas*. Temixco.
- Kim, M., Goldsmidt, V., Pampena, R., Marcos, K., & Martínez, A. (2008). *Optimización del ciclo de vida de los paneles*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional.
- Levitin, M. (Enero 2011). Luz en la mitad del mundo. *PHOTON*, 86.
- Pocco Ramirez, K. (2010). *Energía Solar Fotovoltaica y sus Aplicaciones*. Tacna, Perú.
- Quito Avila, M. (2005). *Diseño y Construcción de un Data Logger Universal con Comunicación RS 232 y USB hacia una PC*. Quito.

Sanchez, M. M. (2004). *Influencia de la Temperatura en el Generador fotovoltaico*. España.

Schumann, R. (2005). *Energía Fotovoltaica*. Tenerife.

Terra. (2010). La energía de fabricar un panel fotovoltaico. *Terra*.

Valero Ortega, J. (2011). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS. INFLUENCIA DE LA POTENCIA PICO, TEMPERATURA DEL PANEL Y CONEXIONADO SERIE*. Sevilla.


Villalta, C. (2005). *ENERGÍA FOTOVOLTAICA*. El Salvador: Editorial PHONIX SonnenStrom AG.

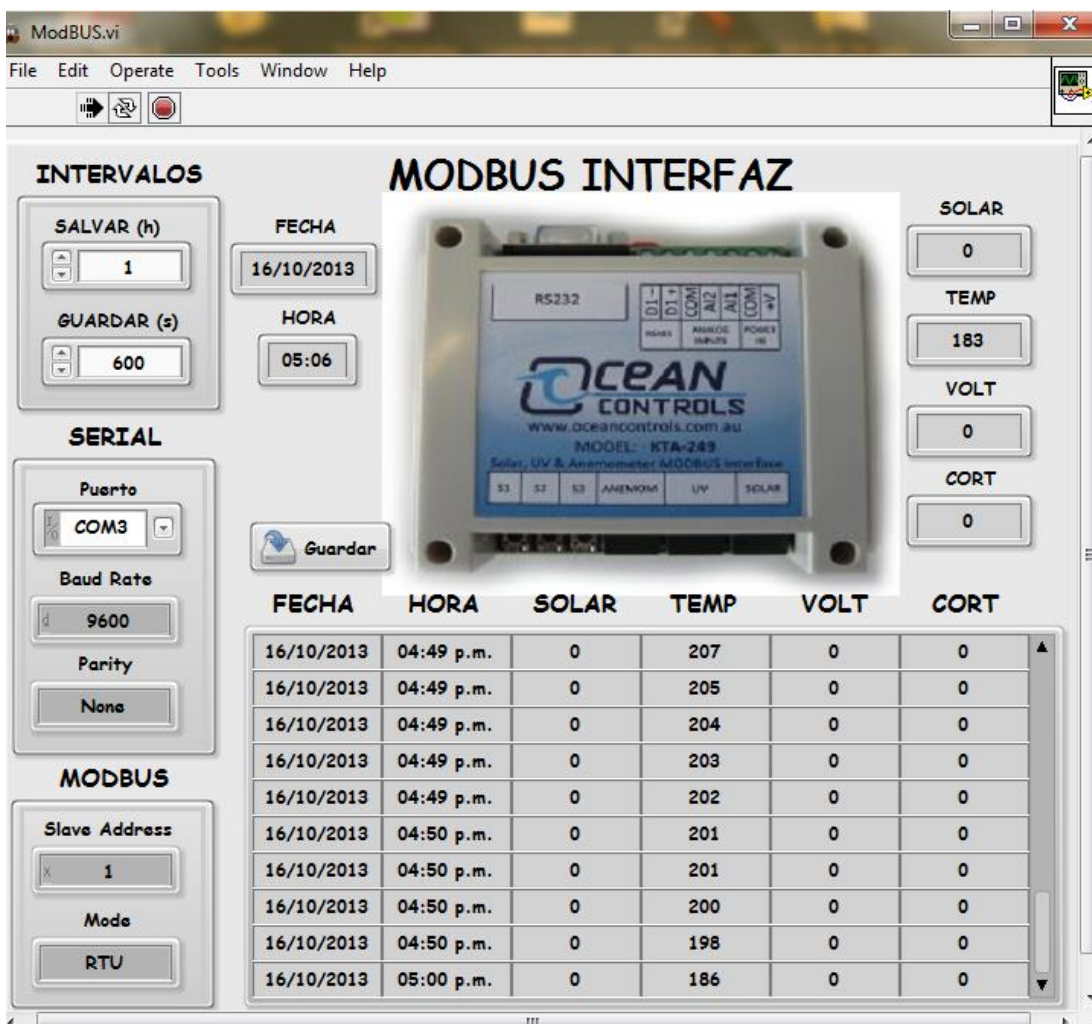
## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### MANUAL DE USUARIO DE PROGRAMA MODBUS.vi

El equipo OCEAN maneja máximo 30 voltios y 20 miliamperios por lo que es necesario determinar la conexión serie o paralelo de los paneles fotovoltaicos de esto depende el valor de las resistencias usadas como divisor de corriente.

Al escoger el icono  se despliega la siguiente pantalla:



FECHA	HORA	SOLAR	TEMP	VOLT	CORT
16/10/2013	04:49 p.m.	0	207	0	0
16/10/2013	04:49 p.m.	0	205	0	0
16/10/2013	04:49 p.m.	0	204	0	0
16/10/2013	04:49 p.m.	0	203	0	0
16/10/2013	04:49 p.m.	0	202	0	0
16/10/2013	04:50 p.m.	0	201	0	0
16/10/2013	04:50 p.m.	0	201	0	0
16/10/2013	04:50 p.m.	0	200	0	0
16/10/2013	04:50 p.m.	0	198	0	0
16/10/2013	05:00 p.m.	0	186	0	0

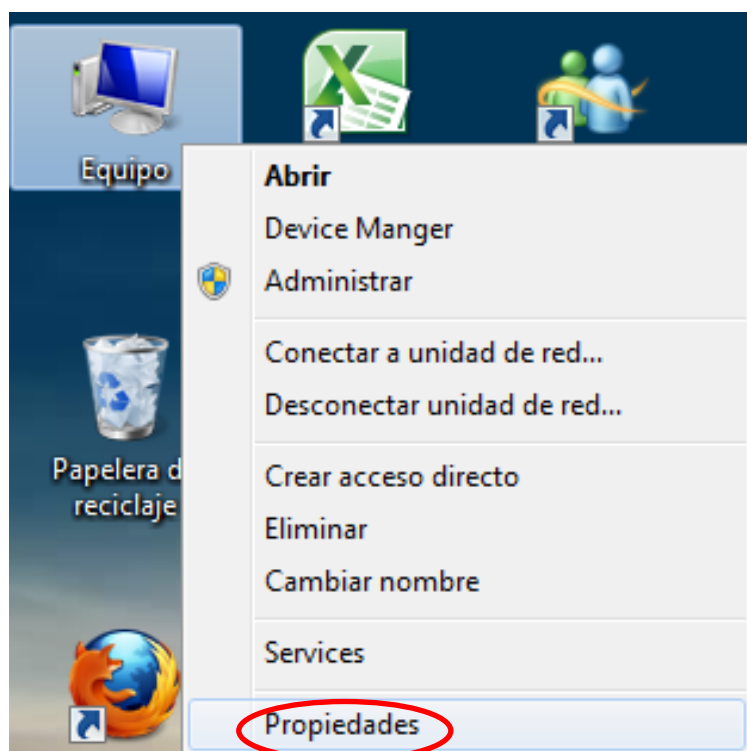
Para configurar el puerto de salida del computador que obtiene información del almacenador de datos OCEANCONTROLS, en la ventana SERIAL se escoge



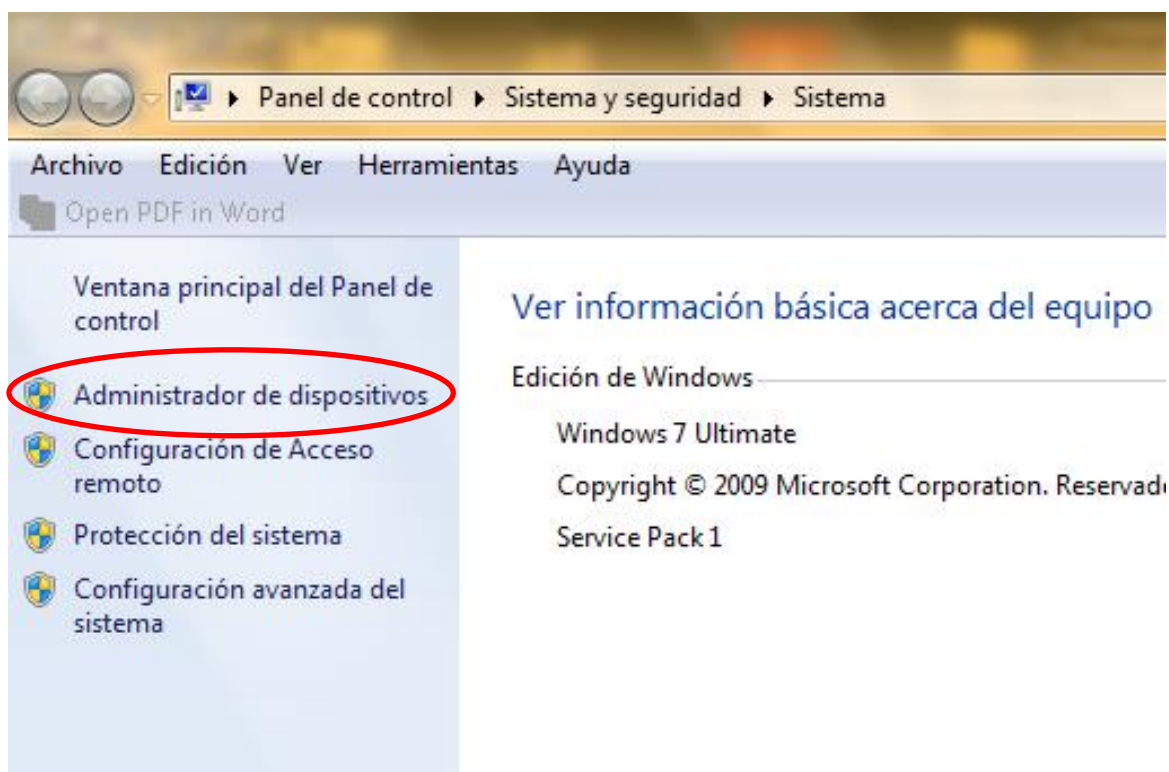
el puerto la velocidad y la paridad, por defecto la velocidad es “9600” y la paridad “ninguna”.



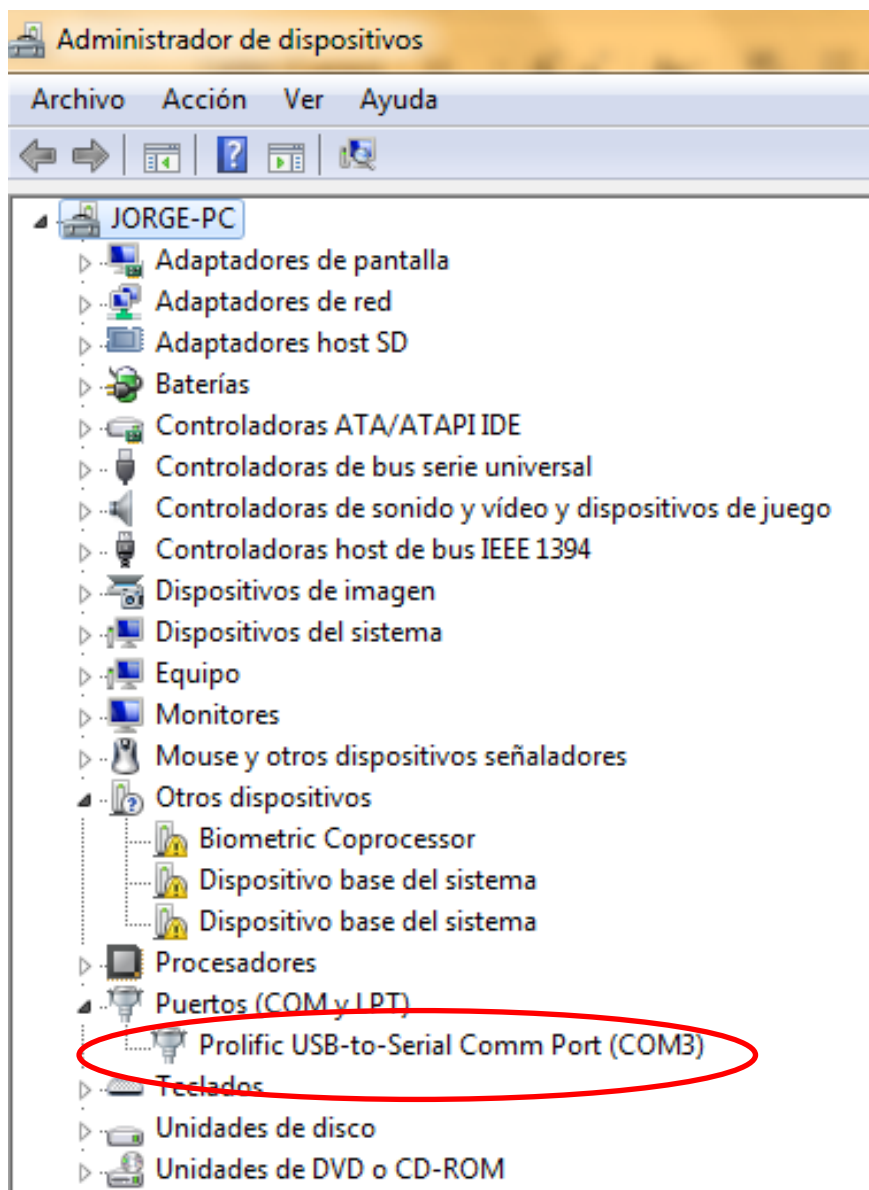
El número del puerto se obtiene conectando el adaptador USB-Serial RS232 entre el computador y el almacenador de datos, luego dar click derecho en el icono de equipo seleccionando Propiedades.



Escoger “Administrador de dispositivos”



Verificar el puerto que está asignado al USB, como se observa el puerto es el COM 3.



El programa ModBUS.vi permite obtener datos con un tiempo configurable en la ventana de "GUARDAR (s)". Los registros serán cada 5 minutos por lo que se ingresa 300 s.



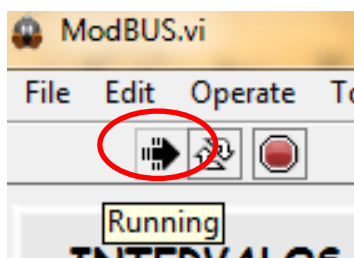
Para generar un reporte en hoja de Excel usar la opción guardar. Por ejemplo si necesita que el reporte se genere cada hora ponemos 1.



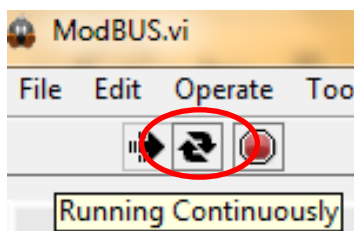
En caso de necesitar generar un reporte en un momento indiferente mantenga pulsado por 2 segundos la tecla guardar, al usar este icono se pierde la continuidad de adquisición de datos por lo que no se recomienda su uso cuando está en etapa de investigación.



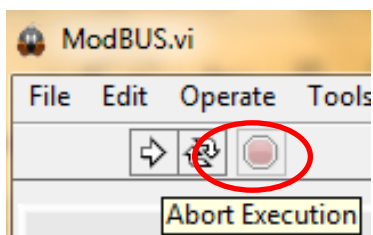
Para poner en marcha el programa ModBUS.vi escoger en la parte superior izquierda la flecha “running” que estará con negrilla cuando esté en funcionamiento y en blanco cuando el programa este sin correr.



Para que el programa este continuamente conectándose con el equipo seleccionar la flecha de redundancia, este modo es el que se usa para la investigación.




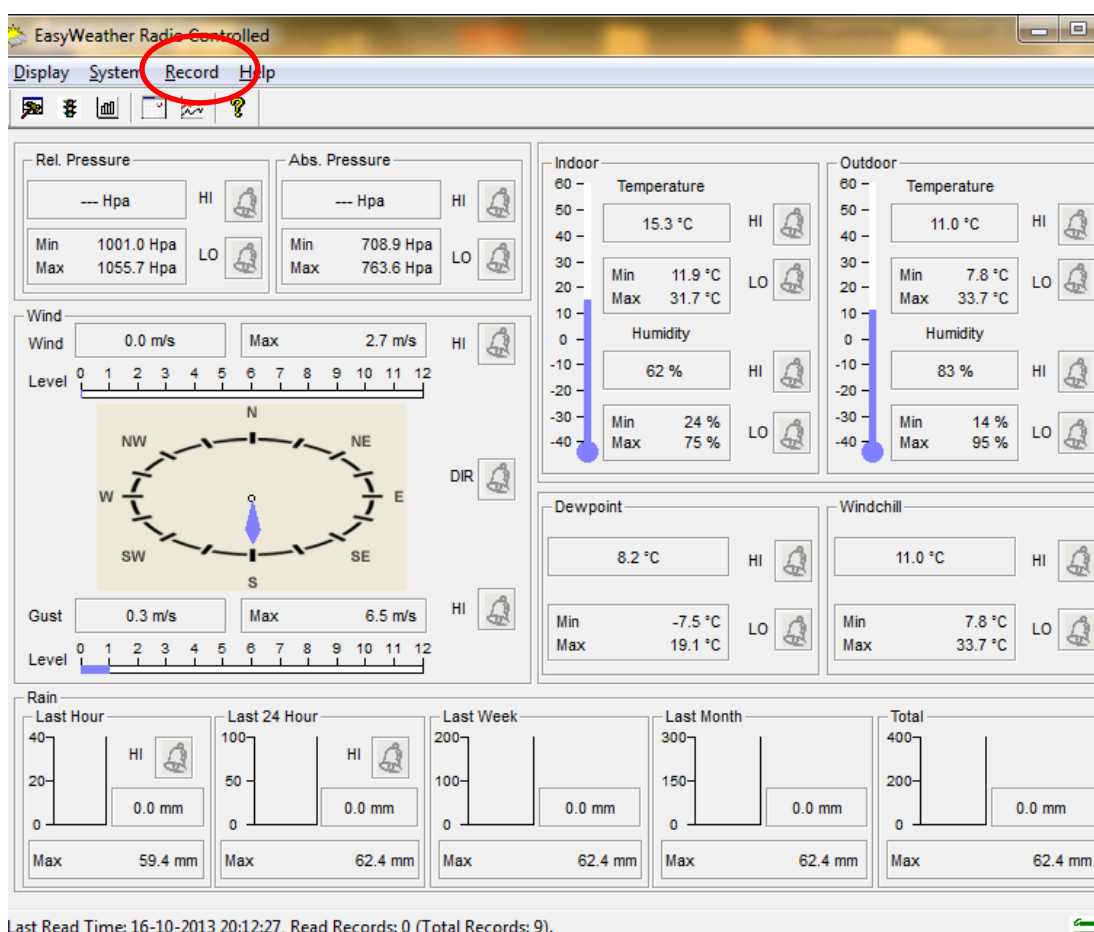
Para terminar la suspensión de datos presionar el botón rojo.



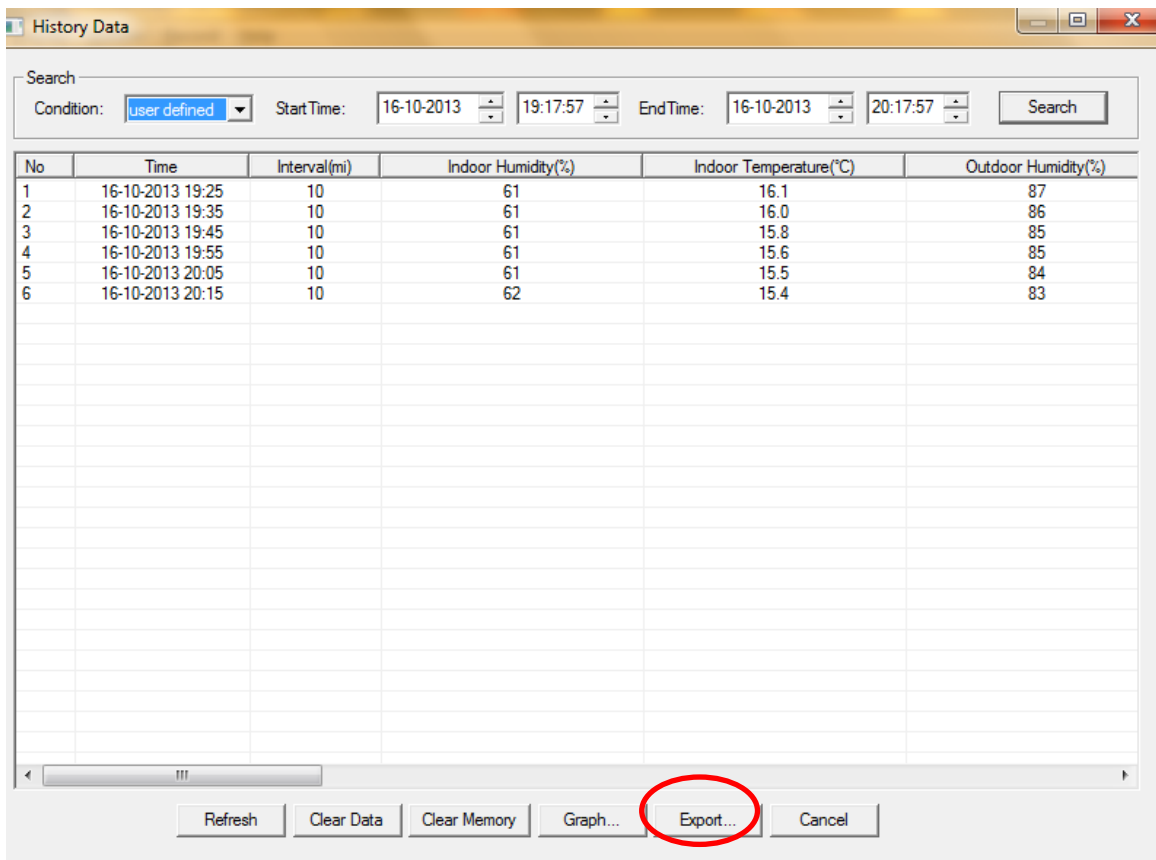
## ANEXO 2

### MANUAL DE USUARIO ADQUISICIÓN DE DATOS EasyWeather.-

Para iniciar la adquisición de datos del EasyWeather Radio Controlled se debe hacer click en el icono  luego se despliega la siguiente pantalla:



En la parte superior izquierda seleccionar la pestaña "Record/History" aquí aparece la pantalla de History Data escoger la condición de "userdefined" que nos permite escoger un rango de tiempo para adquirir los datos.



The screenshot shows a window titled "History Data" with a search bar at the top. The search bar includes a "Condition" dropdown set to "user defined", "Start Time" (16-10-2013 19:17:57), and "End Time" (16-10-2013 20:17:57) fields, along with a "Search" button. Below the search bar is a table with the following data:

No	Time	Interval(mi)	Indoor Humidity(%)	Indoor Temperature(°C)	Outdoor Humidity(%)
1	16-10-2013 19:25	10	61	16.1	87
2	16-10-2013 19:35	10	61	16.0	86
3	16-10-2013 19:45	10	61	15.8	85
4	16-10-2013 19:55	10	61	15.6	85
5	16-10-2013 20:05	10	61	15.5	84
6	16-10-2013 20:15	10	62	15.4	83

At the bottom of the window, there are several buttons: "Refresh", "Clear Data", "Clear Memory", "Graph...", "Export..." (circled in red), and "Cancel".

La pestaña "Clear Data" borra toda la información guardada inclusive la de la PC, en cambio "Clear Memory" borra la información de la memoria interna del equipo de adquisición de datos AmbientWeather.

Para exportar datos en Excel se debe presionar la pestaña "Export" escoger la dirección donde guardaremos el archivo y que datos deseamos añadir.