

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA.

INSTITUTO DE INGENIERÍA



Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería.

Tesis de Maestría

**“Análisis del desempeño y funcionamiento de sistemas fotovoltaicos
instalados en Mexicali, Baja California.”**

Martin Ramsés Vega Castellanos

Director de Tesis

Dr. Juan de Dios Ocampo Díaz

CoDirector

Dr. Héctor Enrique Campbell Ramírez

Febrero de 2015

Resumen

Capítulo 1 – Estado del Arte

1.1 – Planteamiento	5
1.2 Antecedentes	5
1.2.1 Estadística mundial de empleo de sistemas fotovoltaicos	7
1.2.2 Estadística de sistemas fotovoltaicos en México.	8
1.3 – Mercado Actual	
1.3.1 – Paneles Solares	11
1.3.2 – Inversores	12
1.4 - Mexicali, Baja California	
1.4.1 Ubicación y condiciones climáticas	13
1.4.2 Sistemas fotovoltaicos instalados	14
1.5 Hipótesis	16
1.6 Justificación	16
1.7 Objetivo General y específico	16

Capítulo 2 – Marco Teórico

2.1- Efecto fotovoltaico y semiconductores	18
2.2 – Semiconductores tipo n y p	19
2.3 – Sistema fotovoltaico	20
2.3.2 Sistema fotovoltaico conectado a la red	21
2.4 – Panel Fotovoltaico.	23
2.4.1 – Parámetros clave	24
2.5 – Inversor para sistema conectado a red	25
2.5.1- Elementos principales	27
2.5.2 – Parámetros clave para dimensionamiento	28

Capítulo 3 – Metodología

3.1- Actividades	30
3.2 – Diagrama de Flujo	31
3.3 – Monitoreo de sistemas fotovoltaicos	32
3.3.1 Monitoreo local	32
3.3.2 Monitoreo de desempeño	33
3.4 – Resultados esperados	34

Capítulo 4 – Monitoreo de Sistema fotovoltaico Coral Maya

4.1 – Residencia Privada Arenas 3799	35
4.2 – Sistema Fotovoltaico instalado	35
4.2.1 – Panel fotovoltaico	36
4.2.2 – Inversor	37
4.2.3 – Sistema de adquisición de datos	37
4.3 – Mediciones obtenidas	39

4.3.1 – Generación de energía eléctrica	40
4.3.2 – Temperatura ambiente	43
4.3.3 – Irradiación Solar	46
Capítulo 5 – Análisis estadístico de datos monitoreados	
5.1 Introducción	49
5.2 Análisis de Rendimiento Global (Performance Ratio)	50
5.3 Análisis de medias, desviación estándar y varianza	54
Capítulo 6 – Conclusiones	58
Bibliografía	64

Índice de figuras

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1.1 Consumo de energía eléctrica per cápita en países desarrollados y subdesarrollados. y subdesarrollados.	4
1.2 Evolución de la potencia acumulada en el mundo hasta 2010	7
1.3 Evolución de la capacidad instalada y generación de electricidad con sistemas FV en México.	8
1.4..Ubicación de Mexicali, Baja California.	13
1.5 Valores de Irradiación solar global diaria sobre el plano horizontal y temperatura promedio mensual en Mexicali.	13
1.6 Sistemas Fotovoltaicos en Fraccionamiento Valle de las misiones	14
1.7 Sistema Fotovoltaico en albergue temporal DIF	14
1.8 Alumbrado Público con Granja Fotovoltaica: Calzada Independencia	15

2.1 Electrones de valencia liberados, debido a la incidencia de radiación solar	17
2.2 Material pentavalente generando exceso de electrones en un semiconductor tipo n (izquierda) y material trivalente generando exceso de huecos en un semiconductor tipo p.	18
2.3 Esquema básico de un sistema fotovoltaico aislado.	20
2.4 Esquema básico de un sistema fotovoltaico conectado a la red	21
2.5 Curva I-V característica de panel fotovoltaico	23
2.6– Curva característica I-V en función de la irradiación solar	24
3.1– Diagrama de flujo de actividades realizada	30
4.1 – Especificaciones técnicas de panel fotovoltaico	35
4.2 – Especificaciones técnicas de inversor fotovoltaico	36
4.3 – Watts promedio diarios producidos por el sistema el mes de Marzo	39
4.4 – Watts promedio diarios producidos por el sistema el mes de Abril	39
4.5 – Watts promedio diarios producidos por el sistema el mes de Mayo	40
4.6 – Watts promedio diarios producidos por el sistema el mes de Junio	40
4.7 – Watts promedio diarios producidos por el sistema el mes de Julio	41
4.8 – Watts promedio diarios producidos por el sistema el mes de Agosto	41
4.9 – Temperatura promedio diaria en el mes de Marzo	42
4.10 – Temperatura promedio diaria en el mes de Abril	42
4.11 – Temperatura promedio diaria en el mes de Mayo	42
4.12 – Temperatura promedio diaria en el mes de Junio	43
4.13 – Temperatura promedio diaria en el mes de Julio	44
4.14 – Temperatura promedio diaria en el mes de Agosto	44

4.15 – KWh/m^2 totales diarios recibidos en el mes de Marzo	45
4.16 – KWh/m^2 totales diarios recibidos en el mes de Abril	45
4.17 – KWh/m^2 totales diarios recibidos en el mes de Mayo	46
4.18 – KWh/m^2 totales diarios recibidos en el mes de Junio	46
4.19 – KWh/m^2 totales diarios recibidos en el mes de Julio	47
4.20 – KWh/m^2 totales diarios recibidos en el mes de Agosto	47
4.21 – Valores promedio mensuales de energía generada e irradiación solar	48
5.1 – Rendimiento Global del sistema en Marzo 2012	50
5.2 – Rendimiento Global del sistema en Abril 2012	51
5.3 – Rendimiento Global del sistema en Mayo 2012	51
5.4 – Rendimiento Global del sistema en Junio 2012	51
5.5 – Rendimiento Global del sistema en Julio 2012	52
5.6 – Rendimiento Global del sistema en Agosto 2012	52
5.7 Ejemplo de un diagrama de dispersión	54
5.8 RG vs Temperatura para el mes de Marzo	55
5.9 RG vs Temperatura para el mes de Abril	56
5.10 RG vs Temperatura para el mes de Mayo	56
5.11 RG vs Temperatura para el mes de Junio	57
5.12 RG vs Temperatura para el mes de Julio	57
5.13 RG vs Temperatura para el mes de Agosto	58

Índice de tablas

<u>Tabla</u>	<u>Página</u>
1.1 Principales proyectos con sistemas FV conectados	9

a la red en México

1.2 Principales fabricantes de celdas solares en el año 2011	11
1.3 – Estado del mercado global de inversores solares hasta 2009	12
3.1 – Parámetros comunes para monitoreo de Arreglo/Red	32
3.2 – Parámetros climáticos comunes para monitoreo	32
4.1 – Especificaciones técnicas de estación meteorológica	37
4.2 – Especificaciones técnicas de sistema Elite Pro	38
5.1 – Valores de irradiación horizontal, plano inclinado y relación	55
5.2 – Análisis de datos de energía generada (kWh) por el sistema	55
5.3 – Análisis de datos de temperatura ambiente (°C)	55
5.4 – Análisis de datos de irradiación solar (kWh/m ²)	55
5.5 – Análisis de datos de rendimiento global del sistema	55
5.6 – Matriz de datos de rendimiento global, Verano 2012	56
5.7 – Tabla de ANOVA para rendimiento global	56
5.8 – Matriz de datos de energía generada (kWh), Verano 2012	57
5.9 – Tabla de ANOVA para energía generada	57

Resumen

En este trabajo de investigación se presenta la metodología y los resultados obtenidos durante el monitoreo de un sistema fotovoltaico de 1.26 kW para uso residencial, fraccionamiento Coral Maya ubicado en la ciudad de Mexicali, Baja California. Este monitoreo fue realizado durante los veranos de 2011 y 2012, en el proyecto “Evaluación del Comportamiento Térmico y Energético de Viviendas Construidas por Ingeniería Dennis S.A. de C.V.” Convenio Específico con la Universidad Autónoma de Baja California [18].

Los datos recolectados durante el periodo de Marzo-Agosto del 2012, corresponden a variables monitoreadas consideradas importantes para describir el funcionamiento de un sistema fotovoltaico operando en condiciones críticas de temperatura y voltaje. Entre las variables monitoreadas están: la irradiación solar incidente sobre el lugar de instalación, la temperatura ambiente registrada en el lugar de instalación y la energía generada por el sistema.

El registro de mediciones fue utilizado para obtener el factor de rendimiento global, el cual es un parámetro común para obtener la eficiencia que presenta un sistema fotovoltaico conectado a la red. Se obtuvo que los valores de rendimiento global para un sistema fotovoltaico instalado en Mexicali, Baja California oscilan entre 0.7 y 0.9.

Haciendo un análisis de experimentos de las variables de rendimiento global y energía generada se concluyó que existen diferencias significativas entre cada mes, y que la temperatura e irradiación solar son parámetros que afectan a la eficiencia del sistema.

Capítulo 1

Estado del Arte

1.1 Planteamiento del problema

La energía eléctrica tiene una gran importancia en el desarrollo de la humanidad, su uso hace posible la automatización de la producción que aumenta la productividad y mejora las condiciones de vida del hombre. Existe una relación directa entre desarrollo tecnológico y económico de una sociedad, es decir a mayor avance tecnológico y económico las sociedades consumen cada vez más energía. El aprovechamiento de las fuentes renovables de energía ofrece una alternativa en cierta medida para mitigar la crisis energética que se registra actualmente a nivel mundial.

El aprovechamiento y la transformación de la energía solar a través de los sistemas fotovoltaicos (conectados y aislados a la red eléctrica), es una opción de aprovechamiento de la energía contenida en los rayos solares, sin embargo, el funcionamiento y eficiencia de estos sistemas se ve afectado por varios factores entre los cuales destacan las variaciones de voltaje y las temperaturas extremas a las cuales pueden exponerse los mismos durante su operación; convirtiéndose por lo tanto estos dos parámetros mencionados como críticos.

Mexicali, Baja California es una ciudad con alta disponibilidad de radiación solar, razón por la cual existen sistemas fotovoltaicos operando en la región. En algunos de estos sistemas se han realizado monitoreos de las variables térmicas y eléctricas, sin embargo, no se cuenta con un análisis estadístico de dichos datos que ayude a definir la correlación de estas variables con el desempeño y eficiencia del sistema fotovoltaico.

1.2 Antecedentes

Hoy en día, gran parte de la electricidad se produce a partir de recursos no renovables como el carbón, el gas natural, el petróleo y el uranio. Además la demanda está creciendo, siendo superior a la oferta, lo que resulta en una alta fluctuación de los precios mundiales del petróleo.

Para el año 2035 se espera un crecimiento en el consumo de energía eléctrica (TWh) de casi el doble del consumo global actual tal como se muestra en la figura 1.1 [1]

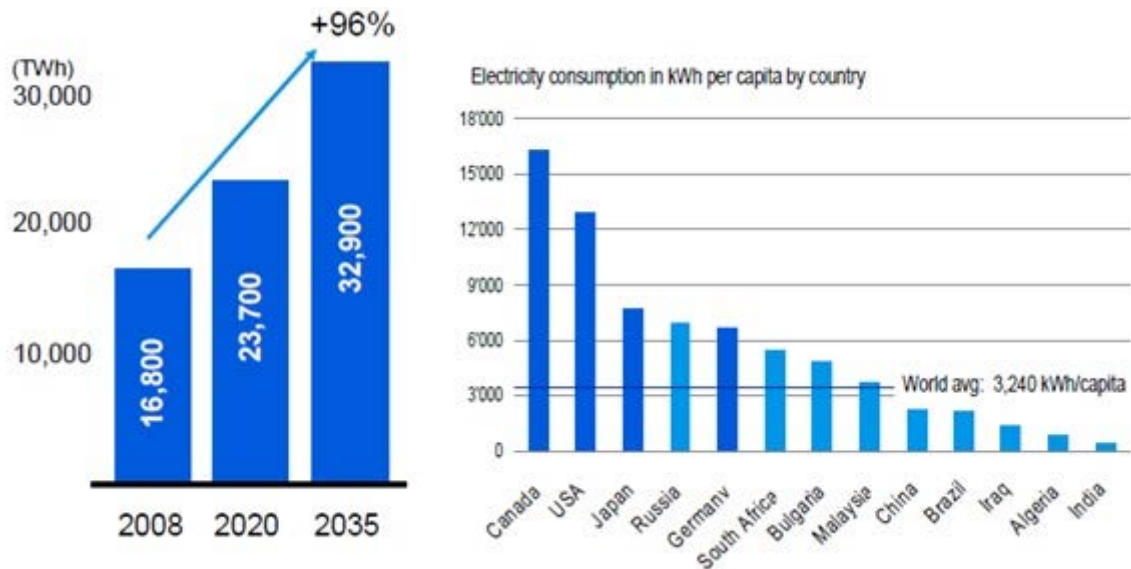


Figura 1.1 Consumo de energía eléctrica (TWh) per cápita en países desarrollados y subdesarrollados.

Debido a este incremento acelerado en el uso de energía eléctrica, es necesario el uso de energías renovables, para lograr satisfacer la demanda, y a su vez, disminuir considerablemente la dependencia hacia los combustibles, que afectan de manera importante el medio ambiente.

La energía solar fotovoltaica se presenta como una alternativa factible, en términos de sustentabilidad, que con el desarrollo adecuado cuenta con el potencial para solucionar gran parte de las necesidades energéticas en la actualidad.

Usando tecnología fotovoltaica con una eficiencia del 10%, se puede convertir energía solar en energía eléctrica suficiente para satisfacer 1000 veces el consumo mundial actual. Aun restringiendo la zona de recolección de energía solar exclusivamente a la superficie sólida terrestre (un cuarto del área de superficie total), se generaría 250 veces más energía que el consumo global. Lo cual nos llevaría a concluir, que se podría cubrir completamente la demanda de energía actual utilizando aproximadamente el 0.4% de la superficie terrestre. [2]

El crecimiento de tecnología fotovoltaica para la generación de electricidad es uno de los más altos en el campo de las energías renovables y se espera que esta tendencia continúe en los próximos años. Se estima que, el total de instalaciones de energía fotovoltaica alcanzará los 350MW para el 2010, 1.8 GW en 2020 y 600 GW en 2050 [3].

La aplicación en auge de la energía solar fotovoltaica es la conexión a la red eléctrica. En la actualidad, los gobiernos de distintos países europeos, Japón y EE.UU., entre otros, están promoviendo incentivos económicos a las energías renovables para intentar contener el cambio climático. En este sentido, existen créditos especiales para financiar las instalaciones fotovoltaicas de conexión a la red y retribuciones por kWh vendido a la compañía eléctrica.

Conseguir que la mayoría de la corriente eléctrica proveniente de la red, sea abastecida por energía fotovoltaica, ha promovido la gestión de nuevas tecnologías destinadas a mejorar el desempeño e incrementar la potencia de los sistemas fotovoltaicos, favoreciendo el desarrollo de nuevos arreglos fotovoltaicos e inversores solares.

1.2.1 Estadística mundial de empleo de sistemas fotovoltaicos

En el año 2007, los sistemas fotovoltaicos conectados a la red fueron la fuente energética con mayor crecimiento, un 83% hasta alcanzar una capacidad instalada total de 8,7 GW. Aproximadamente la mitad de esta producción se le debe a Alemania, considerada la potencia fotovoltaica mundial, a pesar de no caracterizarse por la radiación solar que recibe, seguida de Japón.

A finales del 2010, la potencia acumulada en el mundo era de **40,000 MWp** aproximadamente, de los cuales un 72% (29.000 MWp) se localizan en la unión europea, como se muestra en la Figura 1.2. Para los próximos años se espera un crecimiento continuo a nivel mundial [15].



Figura 1.2 Evolución de la potencia acumulada en el mundo hasta 2010 [15]

1.2.2 Estadística de sistemas fotovoltaicos en México.

De acuerdo con la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), hasta el año 2006, prácticamente todos los sistemas fotovoltaicos, instalados en México, se encontraban en aplicaciones aisladas de la red eléctrica (proyectos de electrificación rural, comunicaciones, señalamientos, bombeo de agua y refrigeración).

Sin embargo, a partir del año 2007 se cuenta con registros de aplicaciones conectadas a la red eléctrica. Esta tendencia se ha mantenido en los años posteriores de tal manera que en el año 2010, de los 3.5 MWp instalados en ese año, alrededor del 94% fueron sistemas conectados a la red eléctrica. Como se observa en la siguiente figura, la capacidad anual instalada (sistemas aislados y conectados a la red) ha mostrado un comportamiento fluctuante en el periodo 2005 – 2010. En términos acumulados, la capacidad aumentó de 16.5 MWp a 28.62 MWp. Respecto a la generación anual de electricidad que se presenta en

la Figura 1.3, ésta aumentó de 23,235 MWh en el año 2005 a 40,115 MWh en el año 2010 [6].

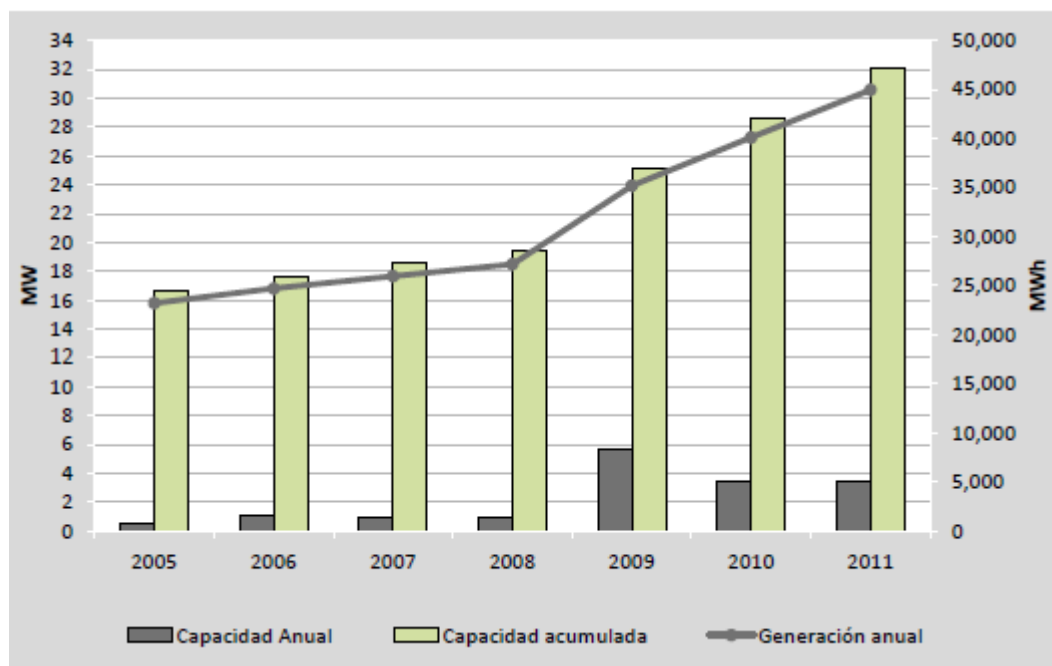


Figura 1.3Evolución de la capacidad instalada y generación de electricidad con sistemas FV en México [6]

Como se puede observar en la Tabla 1.1, los proyectos de mayor tamaño se realizan en los sectores comercial e industrial. Sin embargo, y aunque todavía son pocos, existen proyectos piloto en el sector residencial, los cuales desde hace algunos años están aportando información real que permitirá identificar los beneficios y las soluciones técnicas requeridas para mejorar el desempeño de estos sistemas en conexión a la red.

Tabla 1.1 Principales proyectos con sistemas FV conectados a la red en México [6]

Sector	Lugar y año	Modalidad y desarrollador	Potencia [kW _p]	Observaciones
Industrial	Aguascalientes (2011)	Autoabastecimiento; Autoabastecimiento Renovable S.A. de C.V.	3,800	Se otorgó el permiso ³⁷ para uso de los miembros de la sociedad de autoabastecimiento.
Comercial	Aguascalientes (2009)	Autoabastecimiento; Walmart de México, Aleo Solar AG, G3 Serv. Amb.	174	En operación; para el suministro de 20% de la demanda anual requerida por la tienda.
	Distrito Federal (2006)	Autoabastecimiento; The Green Corner	30.6	En operación; para caracterizar su operación y evaluar desempeño e interacción con la red.
Otros	Distrito Federal-Iztapalapa (2009)	Autoabastecimiento; Universidad Autónoma Metropolitana, Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)	60	En operación; para caracterizar su operación, formar recursos humanos, sensibilizar a la comunidad universitaria.
	Nuevo León (2002)	Prueba piloto; IIE e Iniciativa Privada	1	En operación; para autoabastecimiento de instalaciones municipales.
Residencial	Tijuana, Guadalajara y Región Laguna (2008)	Autoabastecimiento	10 - 20	En operación; bajo el esquema de "medición neta" (10 sistemas de 1 a 2 kW _p , cada uno).
	Mexicali, Baja California (2006)	Autoabastecimiento; Gob. del Estado, CFE, IIE	220	En operación; primer vecindario solar en México (220 casas con sistemas de 1 kW _p cada una); para evaluar el desempeño técnico, beneficios económicos al usuario y al sistema eléctrico.
	La Paz, Baja California Sur (2006)	Prueba piloto Usuario DAC; IIE, CFE, Iniciativa Privada	6	En operación; reclasificación de una tarifa de alto consumo (DAC) a una más baja.

1.3 Mercado Actual

1.3.1 Paneles Solares

El auge de la energía solar es resultado de una serie de factores, entre los cuales se destacan: la reducción de costos de producción de los paneles solares; el desarrollo de nuevas aplicaciones tecnológicas, sobre todo de la nanotecnología que ha permitido reducir los costos de producción e instalación vía la transformación de materiales empleados en los solares que incrementan su eficiencia; y la implementación de políticas para incentivar su uso en alrededor de 100 países, siendo EUA, México, Chile, Perú, Bolivia, Argentina,

Australia, África del Norte, Medio Oriente, India y China, los países con mayor potencial debido a sus características geográficas y climáticas.

El crecimiento de la industria solar fotovoltaica y, en particular, el acelerado desarrollo de la capacidad productiva en China asociado a los bajos costos de las tecnologías solares, ha intensificado la competencia con EUA por el control de la fabricación y suministro de paneles solares, sobre todo, después de la quiebra de la compañía estadounidense Solar World calculada en 528 millones de dólares derivada de su imposibilidad de competir con los precios que ofrecen los fabricantes chinos de celdas solares y de las restricciones en el financiamiento de proyectos de energía solar y eólica, producto de la crisis económica mundial.

Los 10 principales fabricantes de celdas solares para el tercer cuarto del año 2011 que se muestran en la Tabla 1.2, representaban en conjunto el 44% de la producción mundial, de los cuales la mayoría pertenecen al mercado asiático. La compañía First Solar encabezaba el grupo, por muy poco, justo detrás de esta, se encontraban las compañías de origen chino Suntech, Yingli y Trina. Otros proveedores con sede en Asia en la lista incluían a las empresas de Taiwán Motech y NeoSolar.

A pesar de lo que su nombre indica, Canadian Solar tiene la mayoría de sus operaciones y producción en China y por lo tanto sus costos y fijación de precios son típicos de esa región [16].

Tabla 1.2 Principales fabricantes de celdas solares en el año 2011 [16].

<i>Company</i>	<i>% global cell production</i>	<i>Cell production in 3Q11</i>
First Solar	6%	551
Suntech Power	6%	546
Yingli Green Energy	5%	431
Trina Solar	4%	370
SunPower	4%	350
Motech	4%	330
Canadian Solar	4%	325
JA Solar	4%	325
Sharp	4%	316
Neo Solar Power	3%	273

1.3.2 Inversores

El costo de paneles solares disminuyó de 10 a 25% en el primer cuatrimestre del 2010, y se esperaba continuara con esta tendencia hasta estabilizarse para el tercer cuatrimestre de ese año. En contraste, el costo de inversores solares se ha mantenido relativamente estable en los últimos años, con un costo de inversores a pequeña escala (por debajo de 5 kW) que se ha mantenido en el rango de \$0.80 a \$1.00 por Watt, mientras que los inversores a larga escala se han mantenido alrededor de la mitad de este precio.

Son cuatro las grandes compañías dedicadas a la manufactura de inversores solares, que representan el 60 por ciento del mercado de un total de \$ 2.4 mil millones de dólares, con SMA manteniendo un dominio del 38 por ciento del mercado mundial en 2008. SMA anunció que sus ventas totales en la primera mitad del año 2010 equivalían a 792 MW de poder invertido. El año completo de ventas se esperaba estuviera en el rango de \$ 998 a \$ 1.072 millones de dólares. SMA domina el campo de los inversores a menor escala, pero no de inversores a mayor escala.

Satcon ostenta una participación de mercado del 60 por ciento para los inversores de gran escala (>100 kW) en Norteamérica. Sus ingresos totales para el año 2009 se redujeron en aproximadamente \$ 0.6 millones (3%) de \$ 24.7 millones en 2008 a \$ 24.1 millones en 2009 [12].

La Tabla 1.3 muestra las acciones del mercado global correspondientes a algunas de las marcas más influyentes en el campo de los inversores fotovoltaicos en el 2009.

Tabla 1.3 – Estado del mercado global de inversores solares hasta 2009 [13].

INVERTER FIRM	2006 MS%	2007 MS%	2008 MS%	2009 MS%
SMA	24%	33%	38%	40%
Ingeteam	3%	10%	6%	6%
Kaco	6%	7%	8%	8%
Fronius	10%	9%	8%	8%
Enphase	NA	NA	0%	1%

1.4 Mexicali, Baja California

1.4.1 Ubicación y condiciones climáticas

Mexicali capital del estado de Baja California, se encuentra ubicada en las coordenadas $32^{\circ} 43' 06''$ de latitud norte, en el extremo noroeste de México, en frontera con Estados Unidos de América como se muestra en la Figura 1.4, a una altitud promedio de aproximadamente 3 metros sobre el nivel del mar [7].

Por su clima semidesértico la ciudad presenta temperaturas extremas durante todo el año, desde alcanzar los 40°C en verano hasta temperaturas cercanas a cero grados en invierno.

Mexicali está en una de las zonas de mayor radiación solar en México, con valores promedio diario desde los 5.3 hasta $5.8\text{ kWh/m}^2/\text{día}$ con inclinaciones del plano captador desde 0° hasta 30° respectivamente (Ver Figura 1.5).

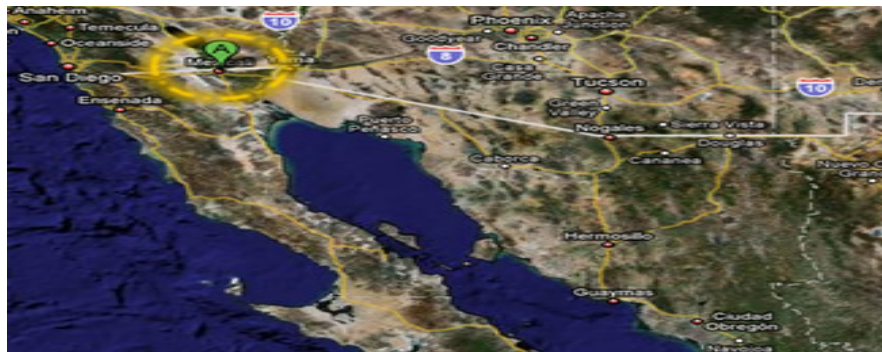


Figura 1.4 Ubicación de Mexicali, Baja California [7].

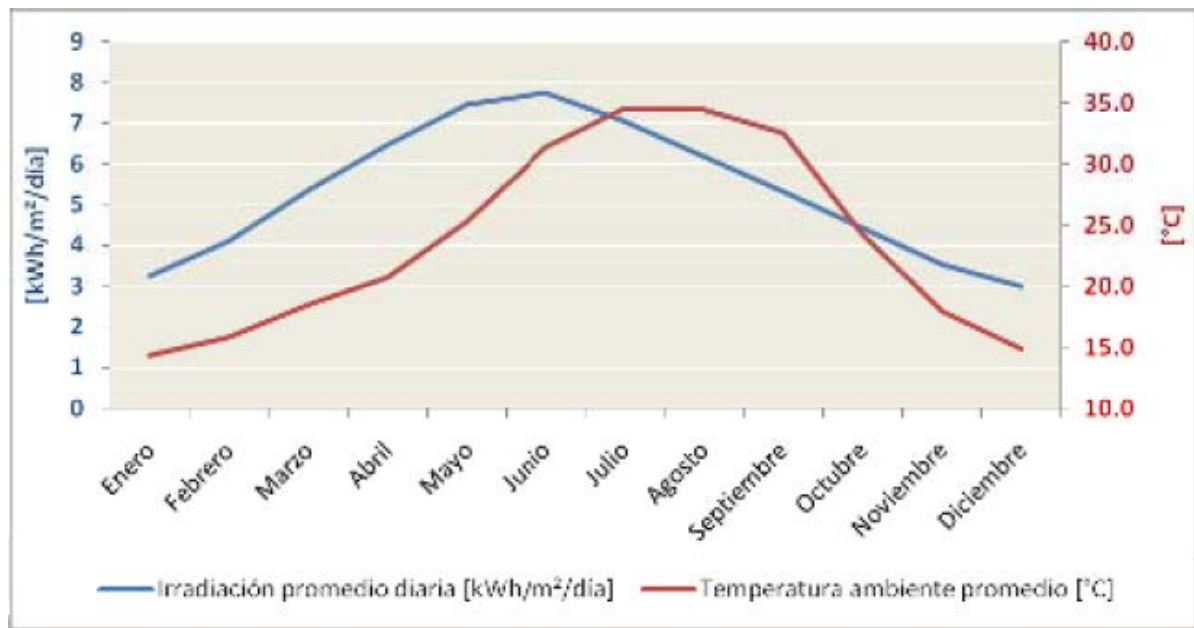


Figura 1.5 Valores de Irradiación solar global diaria sobre el plano horizontal y temperatura promedio mensual en Mexicali [8].

1.4.2 Sistemas fotovoltaicos instalados en Mexicali

Fraccionamiento Valle de las misiones

Fraccionamiento Fotovoltaico que consta de 220 viviendas económicas equipadas con un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica para autoabastecimiento de energía.



Figura 1.6 Sistemas Fotovoltaicos en Fraccionamiento Valle de las misiones [21]

Sistemas Fotovoltaicos en Albergue Temporal DIF Mexicali

Sistema solar fotovoltaico de 7 kW de potencia instalada en techo de albergue temporal DIF (Desarrollo Integral de la Familia) estatal en la ciudad de Mexicali.



Figura1.7 Sistema Fotovoltaico en albergue temporal DIF [21]

Alumbrado Público con Granja Fotovoltaica: Calzada Independencia

Vialidad de 2.5 Km con sistema de iluminación de bajo consumo (LED), ubicada en calzada Independencia. Cuenta con una granja fotovoltaica de 30 kW con interconexión a la red pública.



Figura 1.8 Alumbrado Público con Granja Fotovoltaica: Calzada Independencia [21]

1.5 Hipótesis

El análisis estadístico de los datos de funcionamiento de los elementos principales de un sistema fotovoltaico operando en las condiciones que se presentan en la ciudad de Mexicali, Baja California ayudarán a definir la correlación entre generación de energía del sistema y las condiciones de temperatura y voltaje de la región.

1.6 Justificación

Con el desarrollo de este proyecto de tesis se realizará un análisis del desempeño de un sistema fotovoltaico instalado en Mexicali, Baja California, que permita obtener información para la caracterización de su comportamiento en condiciones de temperatura y variaciones de voltaje detectadas durante el monitoreo del sistema en los meses de verano, con el propósito final de detectar rangos de funcionamiento óptimos para su operación, apoyando así, al desarrollo de nuevas tecnologías orientadas al uso de este tipo de energía renovable.

1.7 Objetivos general y específico

El objetivo de este proyecto de tesis fue el análisis de datos del comportamiento de un sistema fotovoltaico, obtenidos durante su monitoreo en meses de verano, que muestre la correlación de la energía generada por el sistema en condiciones de temperatura y voltaje críticas, identificando rangos de operación óptimos para sistemas instalados en la región.

Los siguientes son los puntos específicos a desarrollar que nos permitirán llegar a nuestro objetivo general:

- Identificar los componentes principales del sistema fotovoltaico y su función, así como los parámetros que deberán ser tomados en cuenta para la evaluación del desempeño del mismo.
- Análisis estadístico de los datos obtenidos durante el monitoreo del sistema en meses de verano.
- Análisis de correlación de variables térmicas, eléctricas y de generación del sistema.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Efecto fotovoltaico y semiconductores

La tecnología fotovoltaica tiene sus bases asentadas en el fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico. Se define como efecto fotovoltaico a la generación de una corriente eléctrica, en ciertos materiales, cuando son expuestos directamente a radiación electromagnética, sin que sea necesaria la intervención de algún efecto mecánico o físico.[8]

La incidencia de radiación solar provee de energía suficiente para provocar la excitación de los átomos de valencia del material expuesto como se muestra en la Figura 2.1, produciendo un flujo de electrones.

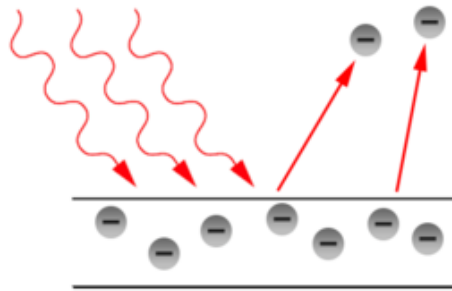


Figura 2.1 Electrones de valencia liberados, debido a la incidencia de radiación solar [8].

Los materiales semiconductores son el soporte de la conversión de energía solar a eléctrica, la semiconductividad, cuando no se encuentra propiamente como una característica del material, puede ser inducida impurificando (dopando) un cristal de determinados elementos químicamente puros con algún otro elemento cuyos electrones de valencia sean mayores o menores en cantidad, a los del elemento que conforma el cristal. A este tipo de semiconductor, con impureza inducida, se le denomina semiconductor extrínseco [10].

El silicio dopado es el semiconductor más usado y comercializado en la actualidad en el campo de la energía solar fotovoltaica. El silicio posee cuatro electrones de valencia para formar enlaces covalentes con otros elementos.

2.2 Semiconductores tipo n y p

Los semiconductores pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de material utilizado para doparlos. En un semiconductor de tipo n, el proceso de dopado del material se logra añadiendo elementos pentavalentes, que al entrar en contacto con la estructura cristalina del silicio, propician que el quinto electrón de valencia, quede muy poco ligado (se dice que está en exceso). El propósito en un dopaje de tipo n, es el de obtener en abundancia electrones portadores en el material. Cuando esto ocurre, el material dopante aporta sus electrones más débilmente vinculados a los átomos del semiconductor. Este tipo de agente dopante es también conocido como *material donante* ya que da algunos de sus electrones que son liberados, al ser expuesto a la radiación solar.

En un semiconductor tipo p, el proceso de dopado se logra al añadir a la estructura del silicio elementos trivalentes. Este material trivalente es también conocido como material aceptor y los átomos del semiconductor que han perdido un electrón son conocidos como huecos. En este caso, el propósito principal del dopaje es la generación de un exceso de huecos dentro de la estructura del material por donde los electrones fluyen cuando son excitados producto de la exposición a la radiación solar.

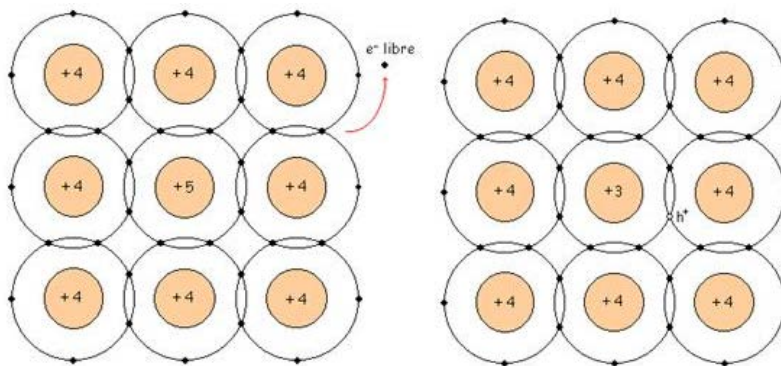


Figura 2.2 Material pentavalente generando exceso de electrones en un semiconductor tipo n (izquierda) y material trivalente generando exceso de huecos en un semiconductor tipo p [8].

2.3 Sistema fotovoltaico

Se define como sistema fotovoltaico al conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que funcionan en conjunto para captar y transformar la energía solar disponible, en energía eléctrica útil.

Estos sistemas, independientemente de la utilización, se pueden dividir en dos categorías: aislados (‘standalone’) y conectados a la red (‘gridconnected’).

La estructura física de un sistema fotovoltaico (aislado o conectado a la red) puede ser muy diferente, pero normalmente se pueden distinguir tres elementos fundamentales: el campo fotovoltaico, sistema de acondicionamiento de la potencia y sistema de adquisición de datos. [9]

2.3.1 Sistema fotovoltaico aislado

Los sistemas aislados se utilizan normalmente para proporcionar electricidad a usuarios con niveles de consumo bajos, o para lugares que resulten inaccesibles para su conexión a la red eléctrica.

Una de sus características principales, es la de contar con sistemas de acumulación de energía por el hecho de no estar conectados a la red. La acumulación es necesaria, pues provee al usuario de energía eléctrica durante horas nocturnas.

Los principales componentes que forman un sistema fotovoltaico aislado son: módulos fotovoltaicos, regulador de carga, inversor y sistema de acumulación (baterías) [9].

El regulador de carga controla el exceso de energía eléctrica generada por el módulo fotovoltaico, y la descarga por exceso de uso que se pudiera presentar en el sistema, los cuales son parámetros clave para la correcta funcionalidad y duración de las baterías de acumulación.

Debido a que la potencia requerida por el usuario no es proporcional a la disponibilidad de radiación solar, una parte de la energía producida por el módulo fotovoltaico debe ser almacenada para su reutilización. Esta es la finalidad del sistema de

acumulación, el cual está formado por un conjunto de baterías recargables, dimensionado de tal manera que garantice la alimentación de carga eléctrica cuando sea requerida.

En cuanto el inversor, su función es la de transformar la corriente continua producida por el panel fotovoltaico a corriente alterna, y debe estar dimensionado para poder alimentar directamente la carga que se le quiere conectar.

En la Figura 2.3 se muestra el esquema básico para un sistema fotovoltaico aislado.

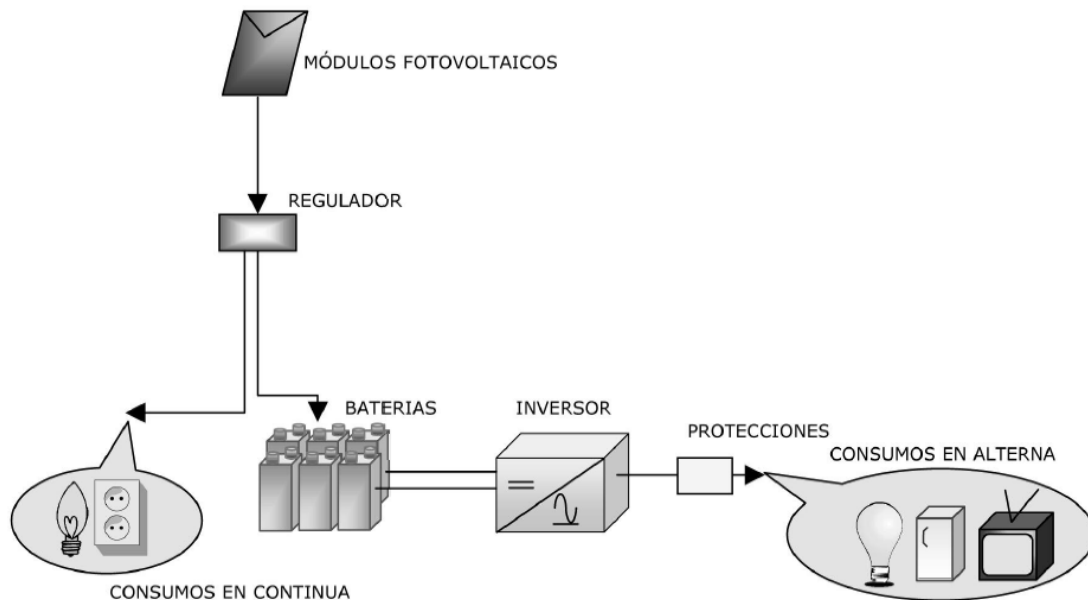


Figura 2.3 Esquema básico de un sistema fotovoltaico aislado [9]

2.3.2 Sistema fotovoltaico conectado a la red

Un sistema conectado a la red, a diferencia de uno aislado, no cuenta con un sistema de acumulación, ya que la energía producida durante las horas de irradiación es canalizada directamente a la red eléctrica. Por lo contrario, cuando la irradiación es escasa o nula, la carga es alimentada de la red eléctrica.

En los sistemas conectados a la red es necesario acoplar con las líneas de distribución cumpliendo con los requisitos que dicta la compañía eléctrica. También se

incluirá un sistema de medición bidireccional, mediante el cual el propietario intercambia la producción de la planta.

Los principales componentes que forman un sistema fotovoltaico conectado a la red son: módulos fotovoltaicos, inversor para la conexión a red, dispositivo de intercambio con la red eléctrica y contador de energía bidireccional.

El inversor transforma la energía continua producida por el módulo, en energía alterna para alimentar el sistema y/o introducirla en la red. Los inversores de este tipo, normalmente están equipados con un dispositivo electrónico que permite extraer la máxima potencia, paso a paso, del generador fotovoltaico.

El dispositivo de intercambio con la red sirve para que la energía eléctrica introducida a la red, tenga las características requeridas por la misma. [9]

Por último, el contador bidireccional, mide la energía producida por el sistema cuando este se encuentra en operación.

En la Figura 2.4 se muestra el esquema básico para un sistema fotovoltaico conectado a la red.

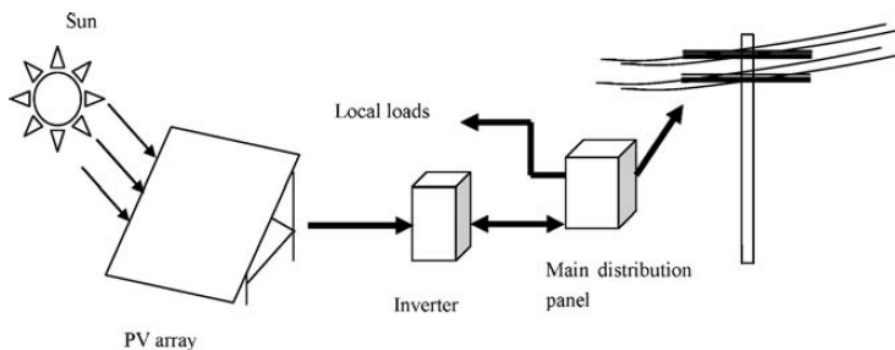


Figura 2.4 Esquema básico de un sistema fotovoltaico conectado a la red [9]

2.4 Panel Fotovoltaico

La célula fotovoltaica es un dispositivo formado por una delgada lámina de un material semi-conductor, frecuentemente de silicio.

Generalmente, una célula fotovoltaica tiene un grosor que varía entre los 0,25 y los 0,35 mm y una forma generalmente cuadrada, con una superficie aproximadamente igual a 100 cm^2

Para la realización de las células, el material actualmente más utilizado es el mismo silicio utilizado por la industria electrónica, cuyo proceso de fabricación presenta costos muy altos, no justificados por el grado de pureza requerido para la fotovoltaica, que son inferiores a los necesarios en electrónica.

Otros materiales para la realización de las células solares son:

-Silicio Mono-cristalino: de rendimiento energético hasta 15- 17 %;

Silicio Poli-cristalino: de rendimiento energético hasta 12 -14 %;

Silicio Amorfo: con rendimiento energético menor del 10 %

Actualmente, el material más utilizado es el silicio mono-cristalino que presenta prestaciones y duración en el tiempo superiores a cualquier otro material utilizado para el mismo fin.

El panel fotovoltaico es una estructura robusta y manejable sobre la que se colocan las células fotovoltaicas. Los módulos pueden tener diferentes tamaños (los más utilizados tienen superficies que van de los 0.5 m^2 a los 1.3 m^2) y constan normalmente de 36 células conectadas eléctricamente en serie.

Curva de corriente vs tensión (curva I-V)

La representación típica de la característica de salida de un dispositivo fotovoltaico (celda, módulo, sistema) la cual se muestra en la Figura 2.5, se denomina curva corriente-tensión.

La corriente de salida se mantiene prácticamente constante dentro del rango de tensión de operación y, por lo tanto el dispositivo se puede considerar como una fuente de corriente constante en este rango. La corriente y tensión a la cual opera el dispositivo fotovoltaico están determinadas por la radiación solar incidente, por la temperatura ambiente, y por las características de la carga conectadas al mismo.

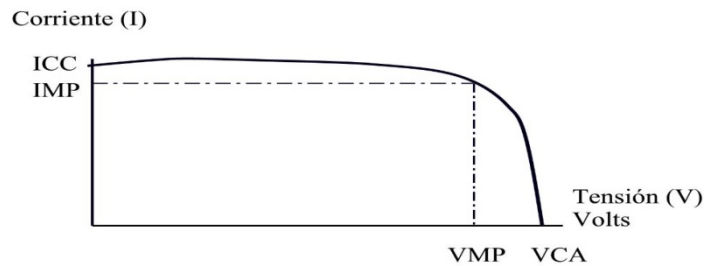


Figura 2.5 Curva I-V característica de panel fotovoltaico [10]

2.4.1 – Parámetros clave

Corriente de cortocircuito (I_{cc}): Máxima corriente que puede entregar un dispositivo bajo condiciones determinadas de radiación y temperatura correspondiendo a tensión nula y consecuentemente a potencia nula.

Tensión de circuito abierto (V_{ca}): Máxima tensión que puede entregar un dispositivo bajo condiciones determinadas de radiación y temperatura correspondiendo a circulación de corriente nula y consecuentemente a potencia nula.

Potencia Pico (P_{mp}) Es el máximo valor de potencia que puede entregar el dispositivo. Corresponde al punto de la curva en el cual el producto $V \times I$ es máximo.

Corriente a máxima potencia (I_{mp}): Corriente que entrega el dispositivo a potencia máxima bajo condiciones determinadas de radiación y temperatura. Se la utiliza como corriente nominal del mismo.

Tensión a máxima potencia (V_{mp}): tensión que entrega el dispositivo a potencia máxima bajo condiciones determinadas de radiación y temperatura. Se utiliza como tensión nominal del mismo.

2.5 Inversor para sistema fotovoltaico conectado a la red.

En un sistema fotovoltaico con conexión a la red eléctrica, la potencia en corriente continua que se genera por el módulo fotovoltaico debe convertirse a corriente alterna para ser inyectada a la red eléctrica. Este requerimiento, crea la necesidad de utilizar un inversor.

Los inversores conectados al módulo fotovoltaico disponen de un buscador del punto de máxima potencia (SPMP) que ajusta continuamente la impedancia de carga para que el inversor trabaje sobre la máxima potencia disponible en el sistema.

El módulo fotovoltaico tiene una curva característica IV no lineal (Figura 2.6)

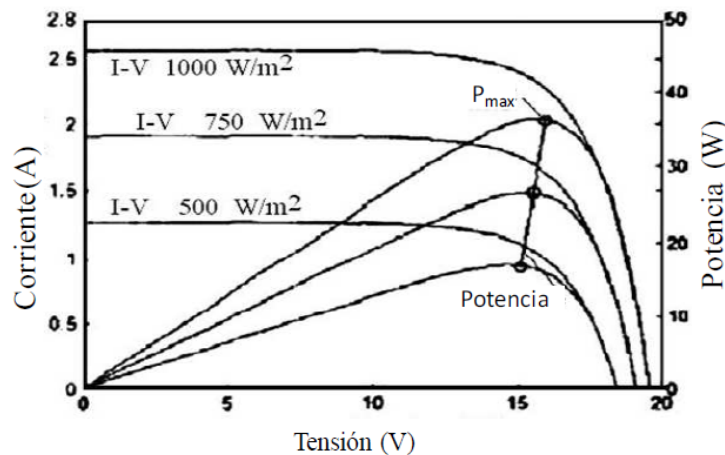


Figura 2.6– Curva característica I-V en función de la irradiación solar [10]

Para una irradiación y una temperatura determinadas, la tensión y corriente del circuito son casi constantes. Sin embargo la tensión del circuito es sensible a la temperatura y disminuye cuando la temperatura aumenta, mientras que la corriente del circuito a su vez es proporcional a la irradiación y aumenta cuando la irradiación aumenta.

El mejor punto de funcionamiento del sistema corresponde al punto, donde la potencia sea máxima (producto de la tensión y la corriente), conocido por el punto de máxima potencia “MPP”, “Maximum Power Point”.

Idealmente, para todo momento en el que el generador esté proporcionando su punto de máxima potencia, el inversor debería operar de manera óptima. Sin embargo, existe una única carga, para cualquier condición de irradiación y temperatura, a la que el generador entrega la máxima potencia.

Dicha carga no se puede elegir arbitrariamente, sino que es variable, por lo que se obtendrán distintos valores de tensión y corriente para cada caso. Bajo estas condiciones, el inversor se encarga de ajustar esas variaciones de carga realizando un seguimiento del punto de máxima potencia (SPMP) o Maximum Power Point Tracking (MPPT). Es decir, según varían esas condiciones, el sistema barre las diferentes posibilidades hasta encontrar la mejor solución posible, aquella que le permita operar en el MPP.

El rendimiento técnico y la fiabilidad de los inversores utilizados por la conexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica son parámetros que pueden fuertemente variar la producción anual de la energía eléctrica y por lo tanto la rentabilidad financiera de un sistema.

Los inversores fotovoltaicos para conexión a la red eléctrica son diferentes de los inversores utilizados en la electrónica convencional, se caracterizan por operar conectados directamente al generador fotovoltaico, El inversor se instala entre el generador fotovoltaico y el punto de conexión a la red. Una vez la energía solar ha sido transformada por el inversor en energía eléctrica, toda esa energía se inyecta en la red, con las ventajas económicas y medioambientales que eso conlleva. [4]

Para optimizar el grado de aprovechamiento del generador fotovoltaico, los inversores deben seguir el punto de máxima potencia. Además deben trabajar con el máximo rendimiento, generando energía con una determinada calidad (baja distorsión armónica,

elevado factor de potencia, bajas interferencias electromagnéticas) y también cumplir determinadas normas de seguridad (para personas, equipos y la red eléctrica).

Al tratar de cumplir con los requisitos antes mencionados, generalmente, los inversores sufren de rendimientos bajos en plantas reales, debido en mayor parte a problemas técnicos, lo que demuestra la no optimización de la conversión y la transferencia de la energía de los paneles solares que llega de manera aleatoria. Esto hace que los sistemas sean demasiado caros con insuficiencias en términos de fiabilidad. Además, su tiempo de vida entre tres y cinco años no es suficiente para satisfacer la necesidad de una fuente de energía fiable y de gran envergadura en comparación con la vida útil de los paneles fotovoltaicos de garantía comercial en un período superior a 25 años.

2.5.1 Elementos principales

Los elementos considerados principales para el funcionamiento de un inversor conectado a un sistema fotovoltaico son los siguientes [11]:

- **Control principal.** Incluye todos los elementos de control general, los sistemas de generación de onda basados en sistemas de modulación de anchura de pulsos (PWM) y parte del sistema de protecciones.
- **Etapas de potencia.** Esta etapa puede ser única o modular en función de la potencia deseada. Se opta por la tecnología en baja frecuencia ya que ofrece buenos resultados con una alta fiabilidad y bajo costo. Además, debe incorporar un filtro de salida (LC), para filtrar la onda y evitar el rizado en la tensión procedente de los módulos.
- **Control de red.** Es la interfase entre la red y el control principal. Proporciona el correcto funcionamiento del sistema al sincronizar la forma de onda generada a la de la red eléctrica, ajustando tensión, fase, sincronismo, etc.
- **Seguidor del punto de máxima potencia (MPPT).** Es uno de los factores más importantes en un inversor. Su función es acoplar la entrada del inversor a los valores de

potencia variables que produce el generador, obteniendo en todo momento la mayor cantidad de energía disponible, la máxima potencia.

- **Protecciones.** De manera general, los inversores deben estar protegidos ante tensión de red fuera de márgenes, frecuencia de red fuera de márgenes, temperatura de trabajo elevada, tensión baja del generador, intensidad del generador fotovoltaico insuficiente, fallo de la red eléctrica y transformador de aislamiento, además de las protecciones pertinentes contra daños a personas y compatibilidad electromagnética.

- **Monitorización de datos.** Los inversores dispondrán de microprocesadores que les facilite una gran cantidad de datos tanto de los parámetros habituales (tensión, corriente, frecuencia, etc.) como de parámetros externos (radiación, temperatura ambiente, etc.) e internos (p.e. temperaturas de trabajo).

2.5.2 Parámetros clave para dimensionamiento

Para desarrollar de manera adecuada el dimensionamiento de un inversor solar es necesario conocer los parámetros que deben ser monitoreados al momento de evaluar el comportamiento de dicho dispositivo. Los principales parámetros habituales [12] a tener en cuenta en un inversor son:

- **Tensión nominal (V).** Tensión que debe aplicarse en bornes de entrada del inversor.

- **Potencia nominal (VA).** Potencia que suministra el inversor de forma continuada.

- **Potencia activa (W).** Potencia real que suministra el inversor teniendo en cuenta el desfase entre tensión y corriente.

- **Capacidad de sobrecarga.** Capacidad del inversor para suministrar una potencia superior a la nominal y tiempo que puede mantener esa situación.

- **Factor de potencia.** Cociente entre potencia activa y potencia aparente a la salida del inversor. En el caso ideal, donde no se producen pérdidas por corriente reactiva, su valor máximo es 1, es decir, estas condiciones son inmejorables para el suministro de corriente del inversor.

- **Eficiencia o rendimiento.** Relación entre las potencias de salida y entrada del inversor.
- **Autoconsumo.** Es la potencia, en tanto por ciento, consumida por el inversor comparada con la potencia nominal de salida.
- **Armónicos.** Un armónico ideal es una frecuencia de onda múltiplo de la frecuencia fundamental. Tener en cuenta que, sólo a frecuencia fundamental, se produce potencia activa.

Capítulo 3 – Metodología

3.1 -Actividades

Para evaluar el desempeño de un sistema fotovoltaico instalado en la región de Mexicali, Baja California se desarrollaron las siguientes actividades:

- Análisis de datos de monitoreo de sistema fotovoltaico instalado en residencia de dos niveles ubicada en fraccionamiento Coral Maya [18]. Los datos utilizados para el análisis del funcionamiento del sistema son la temperatura ambiente, irradiación solar sobre paneles fotovoltaicos, y generación de energía producida (kW) por el sistema.
- Cálculo de factor de rendimiento global durante el periodo monitoreado, para conocer la eficiencia del sistema fotovoltaico instalado en condiciones de temperatura y radiación solar críticas.
- Correlación de factores de desempeño del sistema y temperatura ambiente, determinando el impacto que las condiciones climáticas de la región tienen sobre la eficiencia del sistema.

3.2 –Diagrama de flujo

La metodología propuesta de análisis se incluye en el siguiente diagrama de flujo:

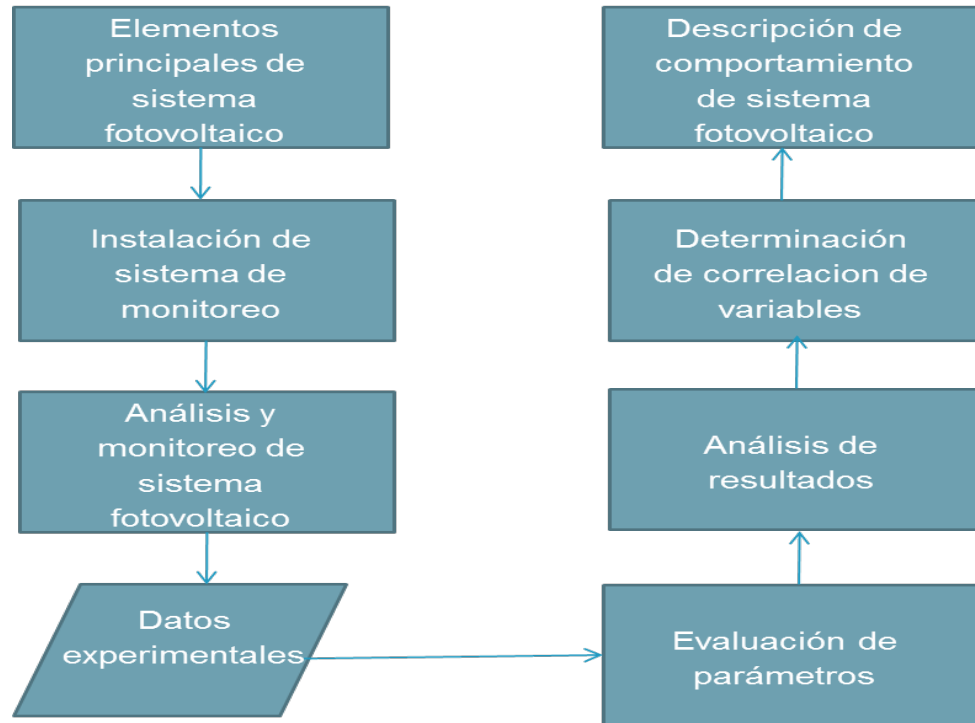


Figura 3.1– Diagrama de flujo de actividades realizada

1. Descripción técnica de los elementos que componen el sistema fotovoltaico y el sistema de monitoreo instalados en residencia ubicada en el fraccionamiento Coral Maya en la ciudad de Mexicali, Baja California.
2. Análisis de datos obtenidos del funcionamiento del sistema fotovoltaico instalado en la residencia Coral Maya en el periodo Marzo- Agosto, tomando en cuenta las variables de generación de energía del sistema, temperatura ambiente y radiación solar.
3. Análisis estadístico para identificar correlaciones entre temperatura y eficiencia del sistema instalado en la residencia.
4. Identificación de parámetros determinantes que afectan la eficiencia del sistema fotovoltaico.

3.3 Monitoreo de sistemas fotovoltaicos

El seguimiento y control de los sistemas fotovoltaicos es esencial para un funcionamiento y rendimiento máximo de cualquier sistema eléctrico solar. El seguimiento más simple de un inversor se puede realizar mediante la lectura de los valores en la pantalla LCD del mismo. Los parámetros más importantes relacionados con el inversor y la red a la que está conectado (energía generada, energía de la red de CA, la corriente del generador fotovoltaico etc.) son desplegados en la pantalla LCD.

Para el seguimiento y control de datos ambientales - como la temperatura de los módulos, temperatura ambiente, radiación solar, velocidad del viento etc. dispositivos de monitoreo son instalados para registrar y almacenar datos para ser analizados posteriormente. El control y monitoreo remoto pueden ser realizados por varias conexiones remotas: módem analógico, RDSI, GSM, etc.

La conexión más común para el control local / remoto es USB (a veces incluso RS232) para monitoreo local, y RS485 y línea eléctrica para la interconexión con el inversor. Bluetooth y Wi-Fi son los más comúnmente utilizados para conexión inalámbrica. Servicios adicionales como monitoreo satelital (SPYCE) también están disponibles.

3.3.1 Monitoreo local

El seguimiento y monitoreo del funcionamiento de los sistemas de energía solar fotovoltaica (PV) es esencial para la evaluación inicial del sistema, y la optimización continua de su eficiencia. Actualmente, la supervisión de instalaciones PV es complicada, costosa y limitada a plantas de energía solar a gran escala conectadas a la red.

La forma más sencilla de realizar un monitoreo local es la visualización disponible en el inversor o en la unidad de control del inversor. Otras posibilidades de monitoreo local incluyen control por PC local a través de la conexión RS232 y / o pantalla remota situada en el lugar de instalación.

Los parámetros indicados en la Tabla 3.1 y en la Tabla 3.2 generalmente pueden ser controlados, registrados y almacenados en la memoria externa o registrador de datos del inversor para un periodo de tiempo específico (por lo general 1 año).

Tabla 3.1 – Parámetros comunes para monitoreo de Arreglo/Red

Voltaje de Arreglo PV	VDC	V
Voltaje de Red	VAC	V
Corriente de Arreglo PV	IDC	A
Corriente de Red	IAC	A
Potencia de Arreglo PV	PDC	W
Potencia de Red	PAC	W

Tabla 3.2 – Parámetros climáticos comunes para monitoreo

Temperatura de panel	Tmod	°C
Temperatura ambiente	Tamb	°C
Radiación global [1]	G	W/m ²
Radiación global [2]	H	J/m ²
Velocidad de viento	V	m/s

3.3.2 Monitoreo de desempeño

La mayoría de la gente está familiarizada con su medidor de electricidad, que mide la cantidad de energía consumida por el usuario. Una vez al mes, la compañía de servicios registra el valor del medidor y envía una factura por los kilovatios-hora utilizados en ese mes.

Este medidor también puede utilizarse para medir la energía producida por un sistema de energía renovable. Sin embargo, para monitoreo de sistemas fotovoltaicos, se

busca conocer la cantidad de energía producida durante cortos intervalos de tiempo (cada hora, cada 5 minutos etc.) en lugar de optar por un monitoreo mensual.

Por lo tanto, medidores más sofisticados comúnmente llamados registradores de datos son necesarios para realizar esta tarea. Los registradores de datos (data loggers) cuentan con sistema de memoria que almacena los datos medidos por el usuario. También tienen interfaces informáticas (Ethernet o puertos serie), lo que permite utilizar una computadora para conectarse a él y recuperar los datos. La computadora puede procesar los datos y producir gráficos o tablas de la producción de energía del sistema.

El monitoreo del desempeño del sistema permite saber de manera inmediata si existe un problema con el funcionamiento del mismo. Por ejemplo, si el sol brilla y se ve que el sistema está produciendo mucho menos energía de lo esperado (o no produce energía en absoluto), entonces el usuario querrá investigar y solucionar el problema lo más pronto posible. Algunos de los propietarios del sistema también están interesados en comparar el rendimiento de su sistema en diferentes condiciones (a pleno sol, nublado, verano, invierno, etc) y durante diferentes momentos del día (mañana, mediodía, tarde, noche, etc).

El análisis de los datos de rendimiento de sistemas fotovoltaicos similares instalados en una región también proporcionará información valiosa sobre la energía que se puede producir para otros sistemas previstos en la zona. A medida que más personas se preocupan por el medio ambiente y las políticas de energía, los datos de rendimiento ayudaran a entender el valor de las tecnologías de energía renovable.

3.4 Resultados esperados

1. Caracterización de parámetros y especificaciones de equipo instalado en sistema fotovoltaico en Mexicali, Baja California
2. Obtención de factores de rendimiento del sistema fotovoltaico para la caracterización de su comportamiento en condiciones de temperatura y radiación solar presentadas en la zona.
3. Análisis estadístico de los datos obtenidos durante el monitoreo de un sistema fotovoltaico instalado en Mexicali, Baja California para los meses de verano.
4. Detección de rangos de funcionamiento óptimos para su operación.

Capítulo 4 - Monitoreo de Sistema fotovoltaico Coral Maya

4.1 –Residencia privada

La residencia monitoreada en los veranos 2011 y 2012 [18] es una vivienda de dos niveles con un área construida de 97 m², modelo TERRA identificada por su ubicación como Manzana 1 Lote 20 con orientación de su fachada hacia el noroeste.

Está acondicionada con 2 pulgadas de aislamiento a base de poliestireno expandido en forma de placas tanto en el techo como en los cuatro muros, se le instaló un equipo de aire acondicionado de eficiencia 13 kBtu/kWh con capacidad de 2.5 ton, un panel fotovoltaico de 1.26 kW de capacidad, un calentador solar de 150 litros de capacidad, un calentador de paso operado con gas natural de 5 lpm de capacidad, un refrigerador de 615 dm³ de capacidad, dos ventiladores de techo y lámparas leds para la iluminación interior. En la alimentación eléctrica se tiene un medidor bidireccional.

4.2 –Sistema fotovoltaico instalado

El sistema fotovoltaico con capacidad de 1.26 kW, está constituido por 6 módulos fotovoltaicos policristalinos con eficiencia de conversión de más de 16%. Estas células están encapsuladas entre una cubierta de vidrio templado y un polímero de capas múltiples de alta resistencia a la acción mecánica actuando como una protección eficiente de las condiciones ambientales más severas. La potencia pico nominal de cada módulo es de 210 W ($\pm 5\%$).

El sistema tiene un inversor que incluye la separación de red (SMA grid guard). La interfase garantiza una mayor seguridad en el funcionamiento de la instalación fotovoltaica y permite la inyección a la red eléctrica pública desde cualquier lugar.

4.2.1 – Panel fotovoltaico

El arreglo de paneles solares utilizados para suplir la demanda eléctrica de la residencia consta de 6 paneles policristalinos Kyocera KD210GX-LP, de 210 Watts, aportando 1.26 kW de potencia instalada.

En la Figura 4.1se presentan las especificaciones técnicas del modelo seleccionado:

■ Especificaciones	
■ Rendimiento Eléctrico bajo Condiciones Normales de Prueba (*)STC	
Potencia Pico Nominal (Ppn)	210 vatios (+5% / -5%)
Voltaje a Ppn	26.6 voltios
Corriente a Ppn	7.90 amperios
Voltaje de Circuito Abierto (Vca)	33.2 voltios
Corriente de Corto Circuito (Icc)	8.58 amperios
Voltaje Máxima de Sistema	600 voltios
Coeficiencia de Temperatura de Vca	-.120 voltios/ °C
Coeficiencia de Temperatura de Icc	5.02 × 10 ⁻³ amperios/°C
*STC: Irradiación 1000Wp/m2 espectro AM 1.5, temperatura de célula 25 °C	
■ Rendimiento Eléctrico a 800Wp/m2 *NOCT, AM1.5	
Potencia Pico Nominal (Ppn)	148 vatios
Voltaje a Ppn	23.5 vatios
Corriente a Ppn	6.32 amperios
Voltaje de Circuito Abierto	29.9 voltios
Corriente de Corto Circuito	6.98 amperios
*NOCT (Temperatura operativa normal de la célula): 49 °C	

■ Células	
Cantidad por módulo	54

■ Características del Módulo	
Longitud × Ancho × Alto	1500mm (59.1 pulg.) x 990 mm (39.0 pulg.) x 36 mm (1.4pulg.)
Peso	18.5 kg (40.8 libras)
Cable	(+)-760 mm (29.9 pulg.),(-)-1840mm(72.4 pulg.)

■ Características de Caja de Conexiones	
Longitud × Ancho × Alto	100mm(3.9 pulg.)x108mm(4.3 pulg.)x15mm(0.6 pulg.)
Código de IP	IP65

■ Otros	
*Temperatura Operativa	-40 °C ~ 90 °C
Fusible Máximo	15A
* Esta temperatura se base en la temperatura de la célula.	

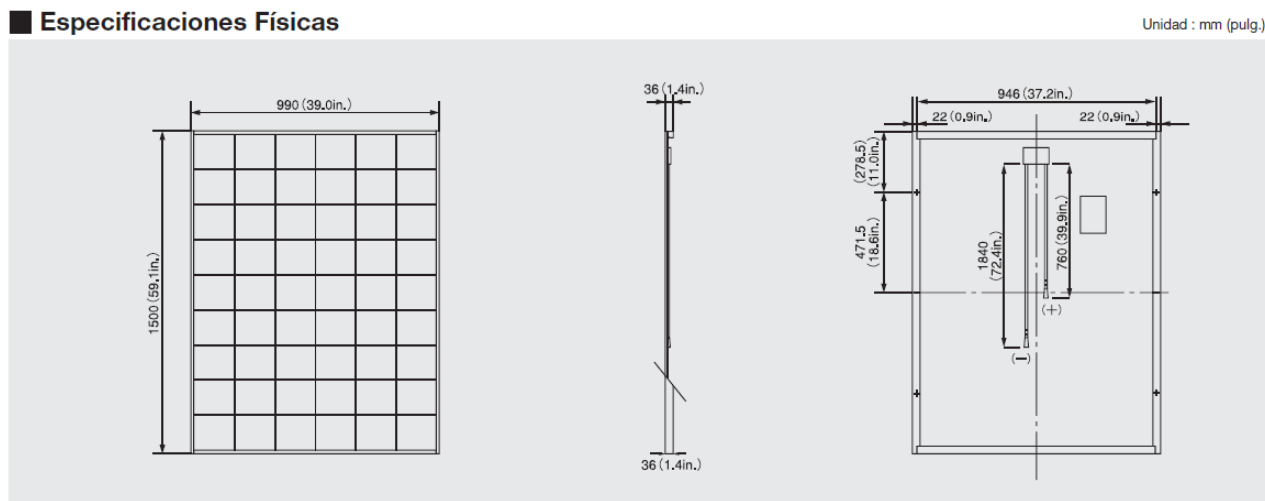


Figura 4.1 – Especificaciones técnicas de panel fotovoltaico [19]

4.2.2 – Inversor

El inversor utilizado para la conversión de energía (CD/CA) producida por el arreglo de paneles solares es un micro inversor SMA SunnyBoy 1100 con capacidad de potencia de 1210 W

En la Figura 4.2 se presentan sus especificaciones técnicas:

Entrada (CC)	
Potencia máxima de CC	1210 W
Tensión máx. de CC	400 V
Rango de tensión fotovoltaica, MPPT	139 V – 320 V
Corriente máx. de entrada	10 A
Número de seguidores de MPP	1
Número máximo de Strings (en paralelo)	2
Salida (CA)	
Potencia nominal de CA	1000 W
Potencia máxima de CA	1100 W
Corriente máx. de salida	5,6 A
Tensión nominal de CA / rango	220 V – 240 V / 180 V – 260 V
Frecuencia de red de CA (de ajuste automático) / rango	50 Hz / 60 Hz / $\pm 4,5$ Hz
Factor de potencia ($\cos \phi$)	1
Conexión de CA	monofásica
Rendimiento	
Rendimiento máx.	93,0 %
Rendimiento europeo	91,6 %

Figura 4.2 – Especificaciones técnicas de inversor fotovoltaico [20]

4.2.3 – Sistema de adquisición de datos

Los sistemas de medición instalados para esta vivienda registran datos de temperatura ambiente y energía eléctrica generada por el sistema para obtener una descripción adecuada del comportamiento del sistema. Se utilizó una estación meteorológica para obtener registros de temperatura, radiación solar, velocidad y dirección de viento, humedad y precipitación pluvial en el lugar de instalación, así como un sistema de adquisición de datos para el registro de variables eléctricas

Temperatura Ambiente

Estación meteorológica Vantage Pro 2 (Davis Instruments)

Incluye dos componentes: el conjunto integrado de sensores (ISS) y la consola. El ISS incluye el módulo interfaz de sensores (SIM), pluviómetro, anemómetro, y abrigo de

radiación pasivo. La consola Vantage Pro2 proporciona la interfaz para el usuario, visualización de datos, y los cálculos.

En la Tabla 4.1 se presentan las especificaciones técnicas de la estación meteorológica.

Tabla 4.1 – Especificaciones técnicas de estación meteorológica

Temperatura de funcionamiento	-40° a +60°C
Temperatura de almacenamiento	-45° a +70°C
Fuente de alimentación, SIM ISS	Transformador AC
Conectores	Modular RJ-11
Tipo de cable	4-conductores, 26 AWG
Longitud de cable, consola	30 m (incluido)
Sensor de velocidad de viento	Cazoletas con interruptor magnético
Sensor de dirección del viento	Veleta con potenciómetro
Pluviómetro	Balancín, 0.2 mm por volcado
Sensor de temperatura	Termistor
Material de la carcasa	Plástico ABS resistente a los UV
Dimensiones	279 mm x 238 mm x 355 mm
Peso	2.6 kg / 2.8 kg

Generación eléctrica del sistema

Elite Pro (Dent Instruments)

Es un medidor de energía de varias fases con grabación a intervalos que permite medir, registrar y analizar las cargas eléctricas. Registra prácticamente todos los parámetros del sistema eléctrico, como son tensión, corriente, potencia, factor de potencia, consumo, etc

En la Tabla 4.2 se muestran las especificaciones técnicas del sistema de adquisición de datos.

Tabla 4.2 – Especificaciones técnicas de sistema Elite Pro

Entradas	4 canales de corriente, 0-6000 A 3 canales de voltaje, 0-600 V (AC/DC)
Potencia	Volts, Amps, Watts, kWh, kVAh, Volt-Amps Reactivos, kVARh, Factor de Potencia
Tipo de medición	True RMS
Frecuencia	50, 60 ó 400 Hz
Precision	<1% de lectura, exclusivo del sensor (0.2% típico)
Resolución	12 bit A/D (1 part in 4,096)
Memoria	25,000 medidas estándar, 100,000 medidas High-Memory
Frecuencia de muestreo	7.28 kHz
Intervalos de registro	3, 15, 30 segundos 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 minutos 1, 12, 24 horas

4.3 – Mediciones obtenidas

Para el sistema fotovoltaico instalado en la residencia ubicada en Coral Maya se obtuvo la información de las variables de generación de energía eléctrica, temperatura ambiente e irradiación solar del lugar de instalación [18], para realizar un análisis estadístico que pueda determinar una relación significativa entre ellas, e identificar temperaturas críticas en las que la generación de energía eléctrica del sistema pudiera verse afectada.

El análisis del desempeño del sistema, fue monitoreado en el periodo de Marzo-Agosto del año 2012, meses en los que se registran las temperaturas más altas para la ciudad de Mexicali, Baja California y las mediciones fueron tomadas en intervalos de 1 hora para cada día del mes. Los datos contenidos en este capítulo se muestran en promedios diarios obtenidos para cada mes del periodo de verano, de la energía generada por el sistema y la temperatura registrada, con el fin de presentar la información de una manera clara y sintetizada.

4.3.1 – Generación de energía eléctrica

En las figuras 4.3 a 4.8 se presentan las mediciones obtenidas para cada mes de verano (periodo Marzo-Agosto 2012) indicando los valores promedio para cada día del mes. Los días con un valor de cero corresponden a días de los que no se tiene información de la generación del sistema.

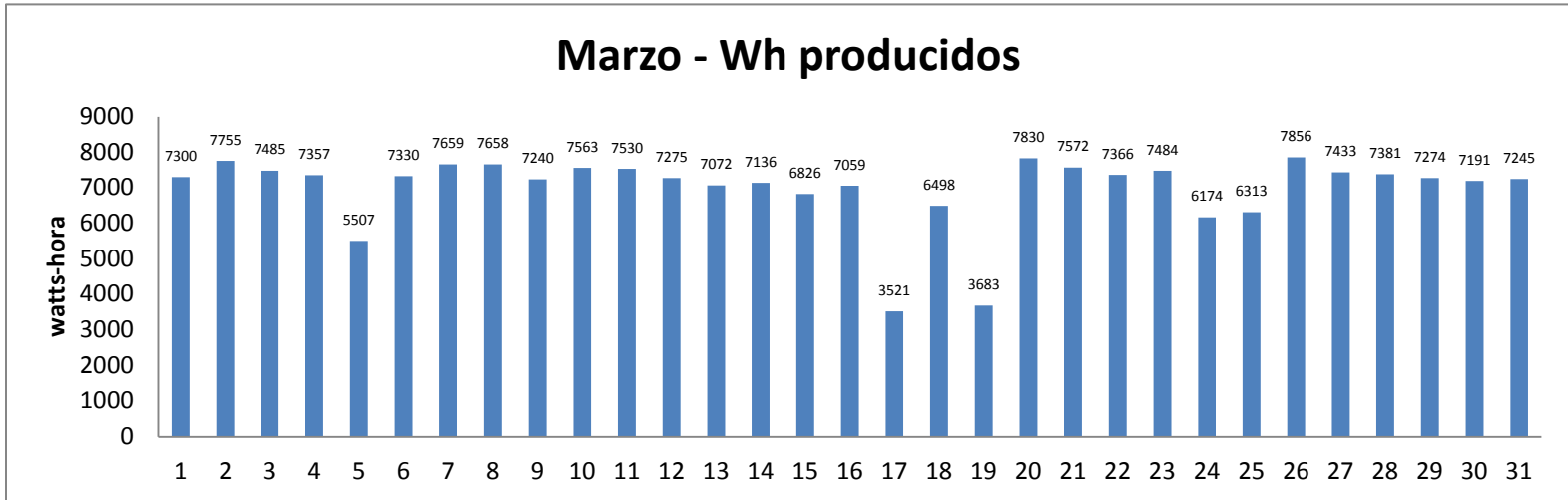


Figura 4.3 – Watts-hora promedio diarios producidos por el sistema el mes de Marzo

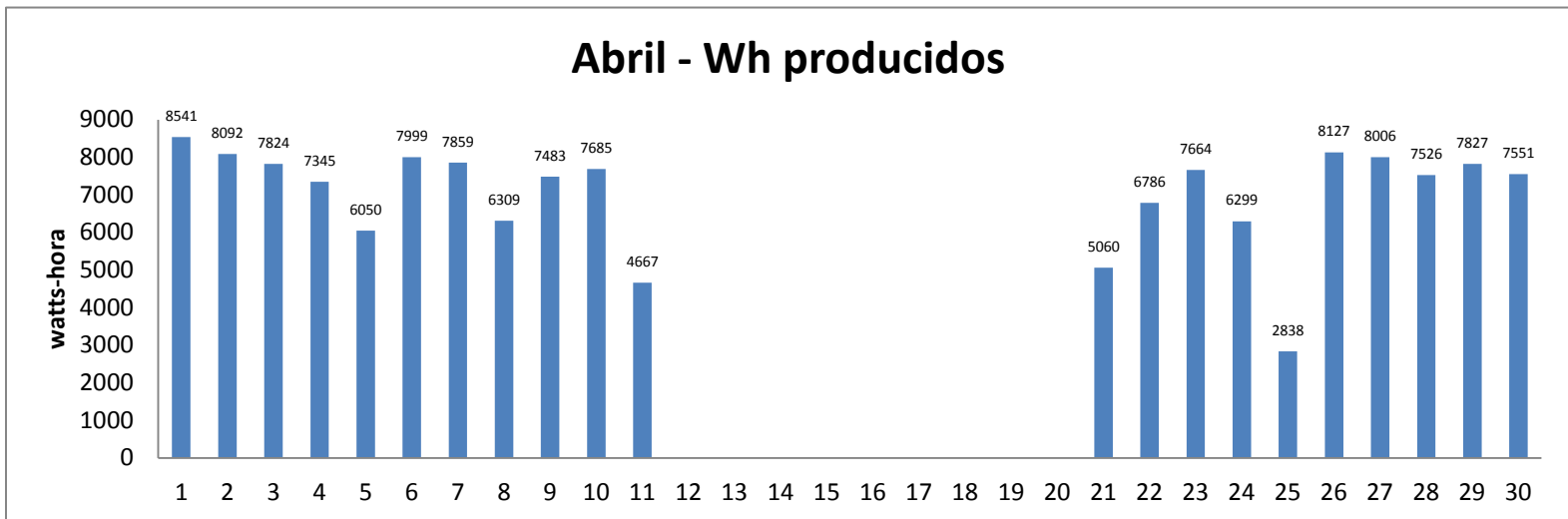


Figura 4.4 – Watts-hora promedio diarios producidos por el sistema el mes de Abril

Mayo - Wh producidos

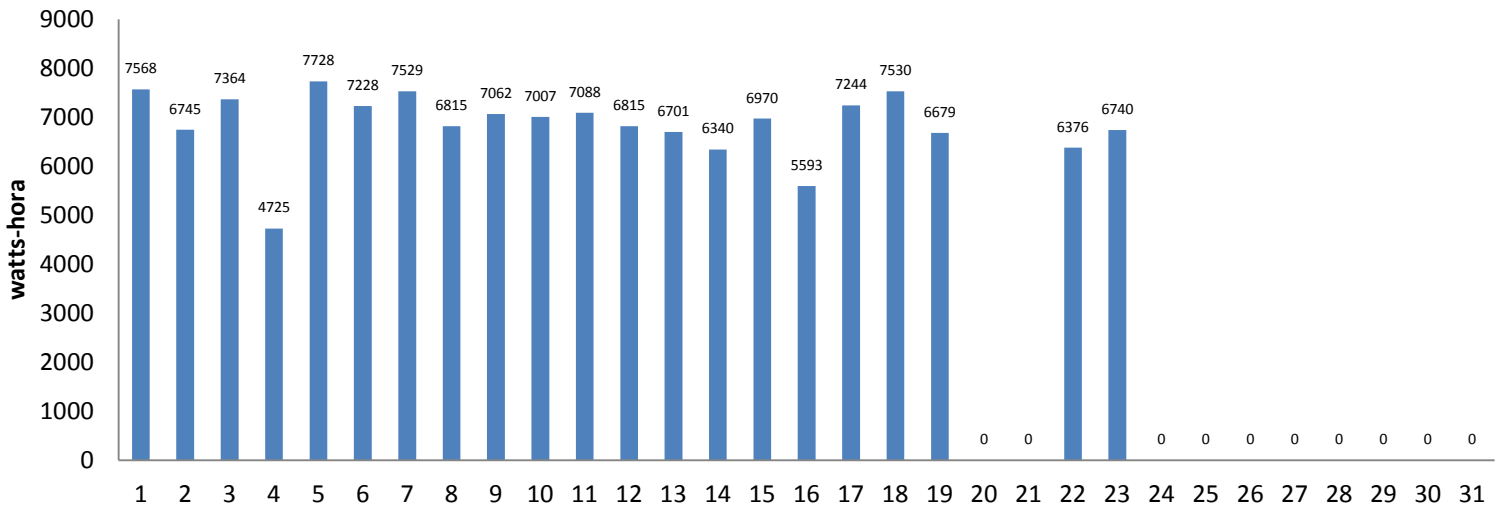


Figura 4.5 – Watts-hora promedio diarios producidos por el sistema el mes de Mayo

Junio - Wh producidos

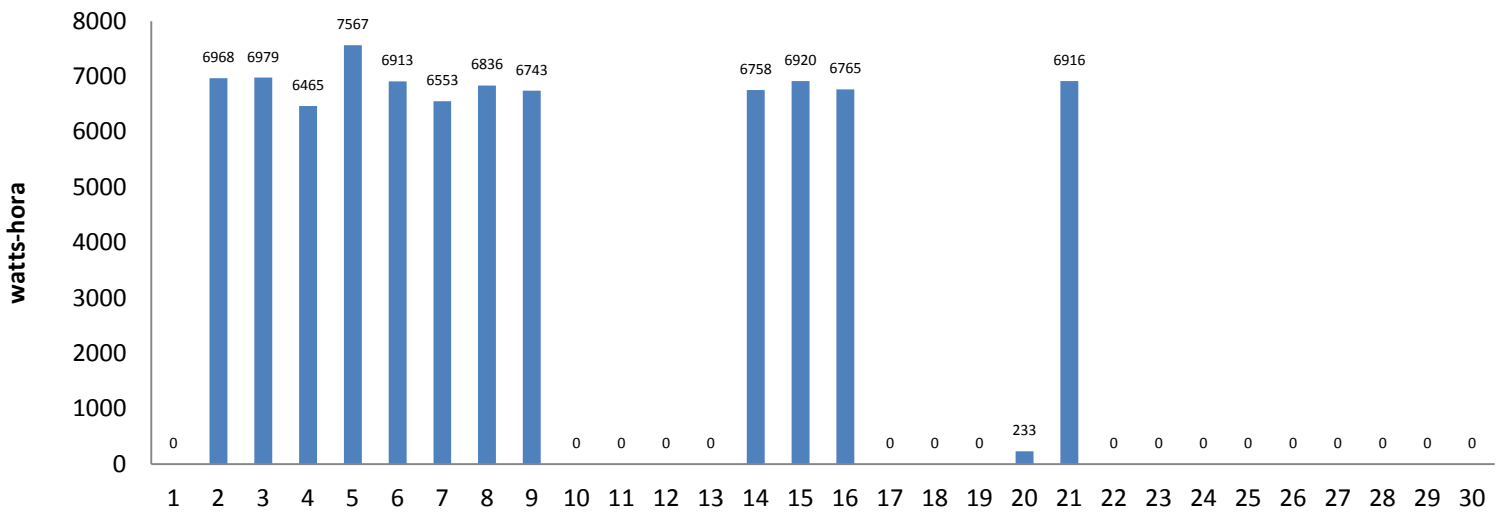


Figura 4.6 – Watts-hora promedio diarios producidos por el sistema el mes de Junio

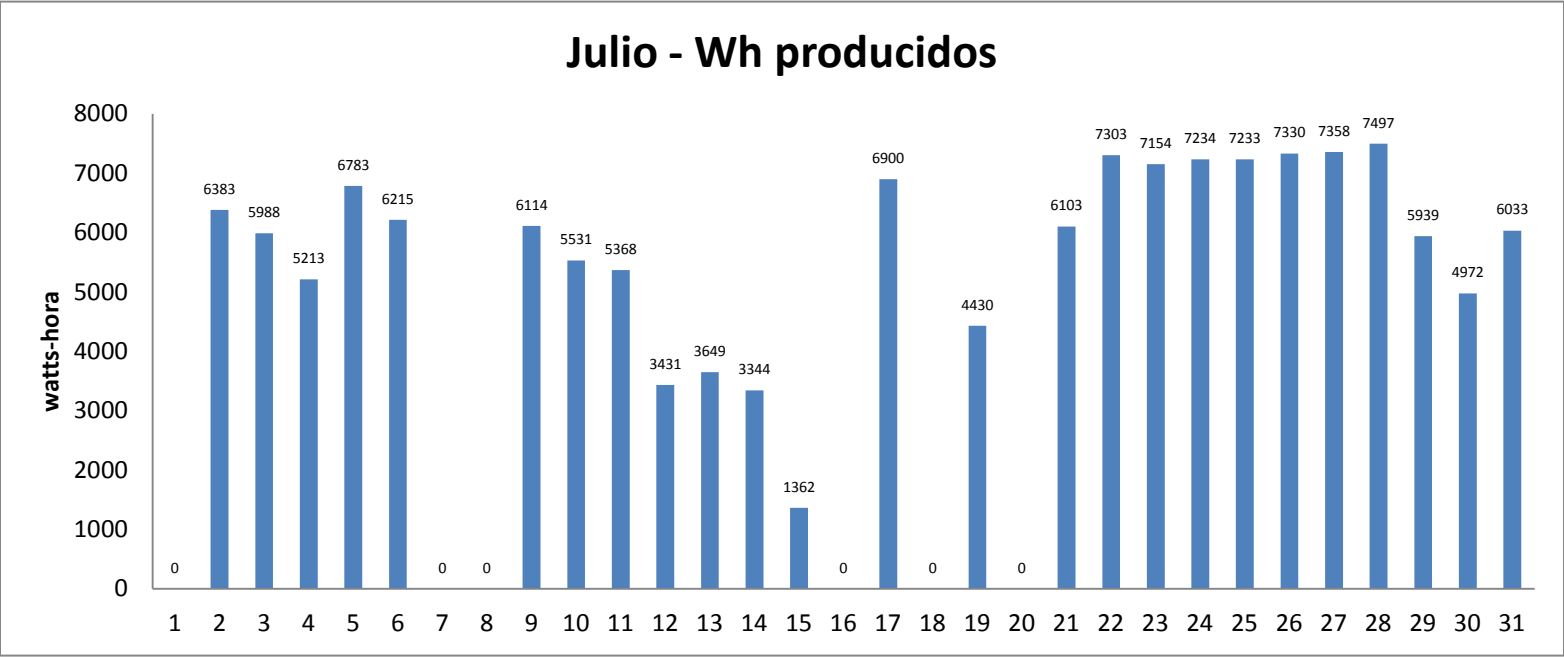


Figura 4.7 – Watts-hora promedio diarios producidos por el sistema el mes de Julio

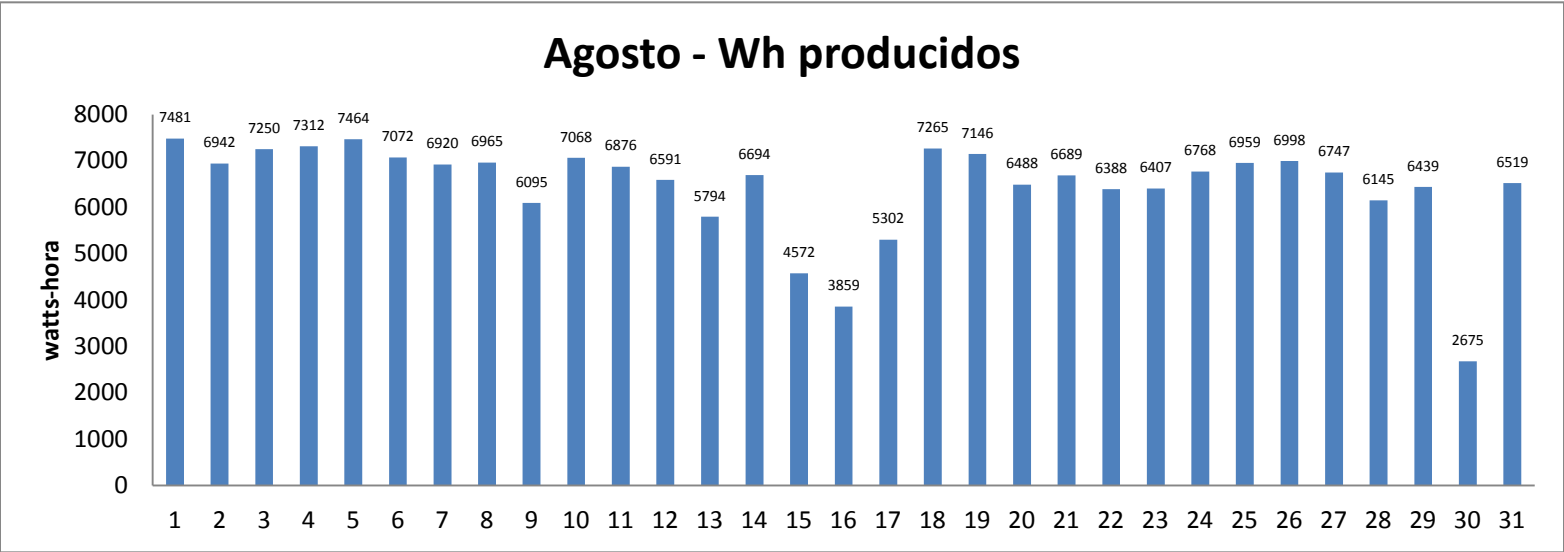


Figura 4.8 – Watts-hora promedio diarios producidos por el sistema el mes de Agosto

4.3.2 – Temperatura ambiente

En las figuras 4.9 a 4.14 se presentan las temperaturas obtenidas para cada mes de verano (periodo Marzo-Agosto 2012) indicando los valores que se obtuvieron promediando mediciones horarias de temperatura ambiente para cada día del mes. Los días con un valor de cero corresponden a días de los que no se tiene información de la temperatura.

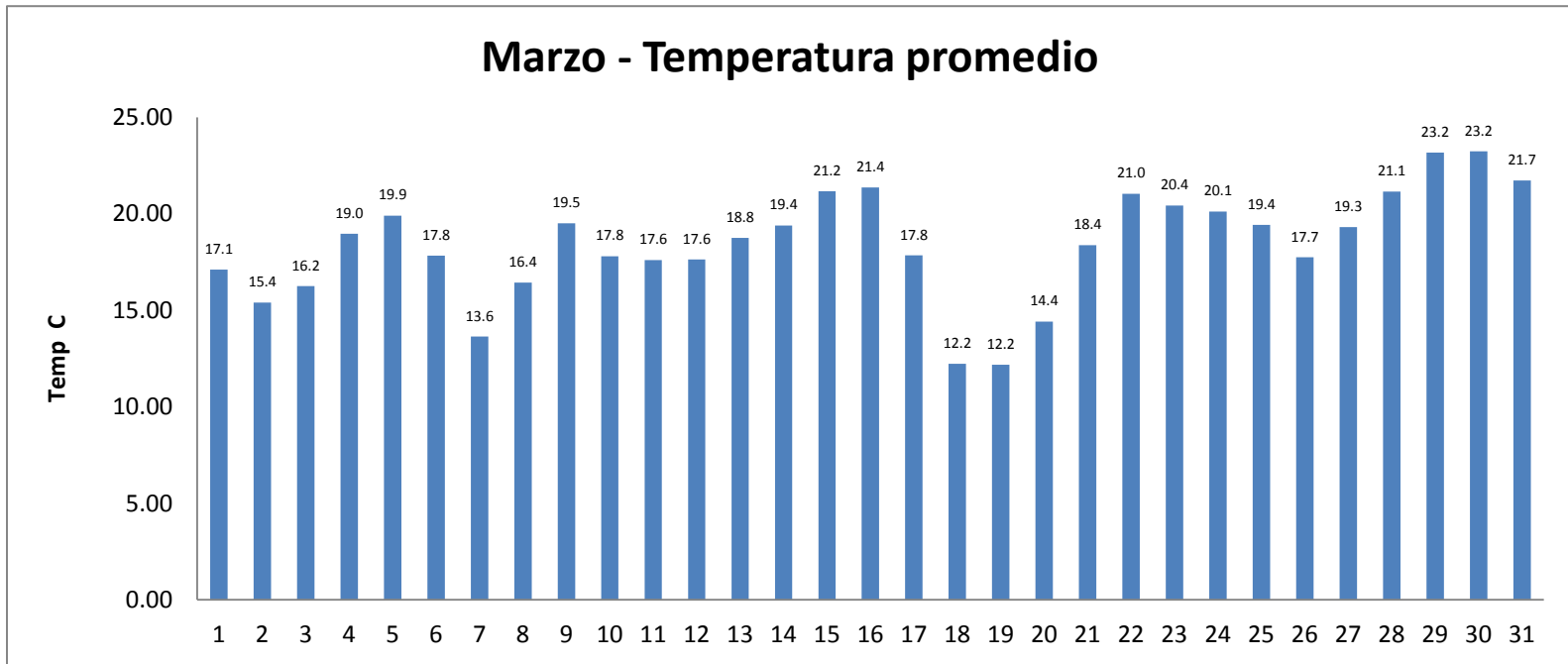


Figura 4.9 – Temperatura promedio diaria en el mes de Marzo

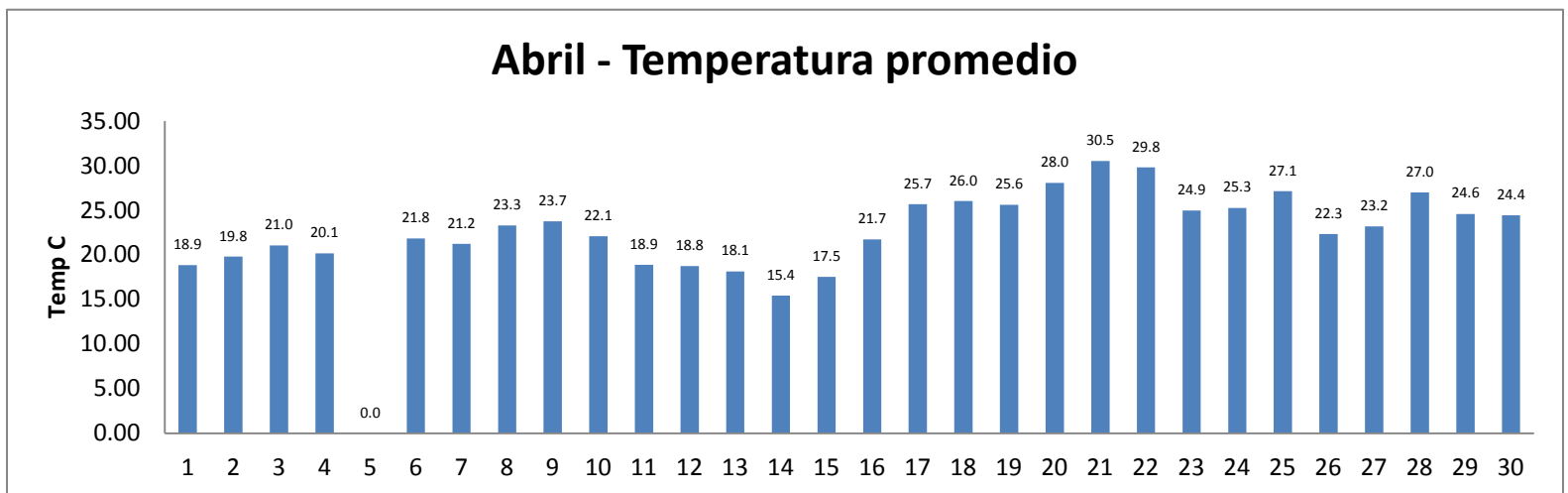


Figura 4.10 – Temperatura promedio diaria en el mes de Abril

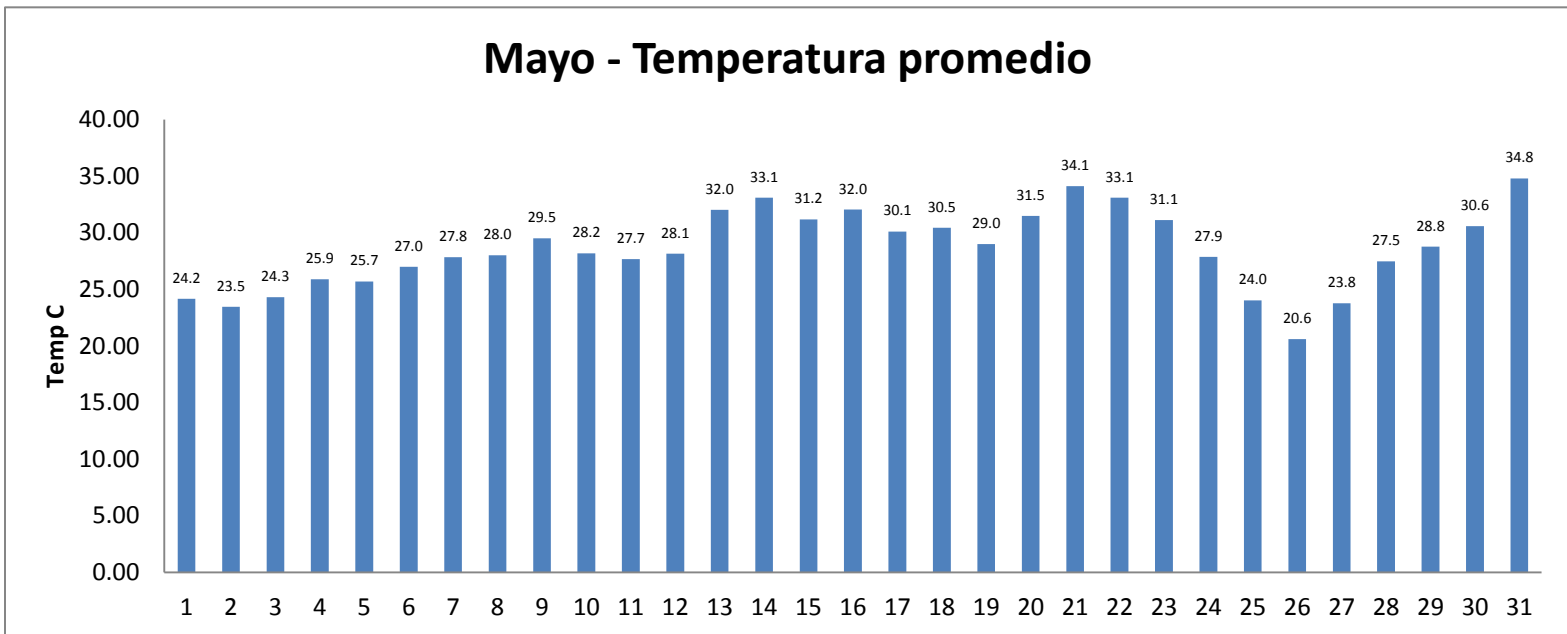


Figura 4.11 – Temperatura promedio diaria en el mes de Mayo

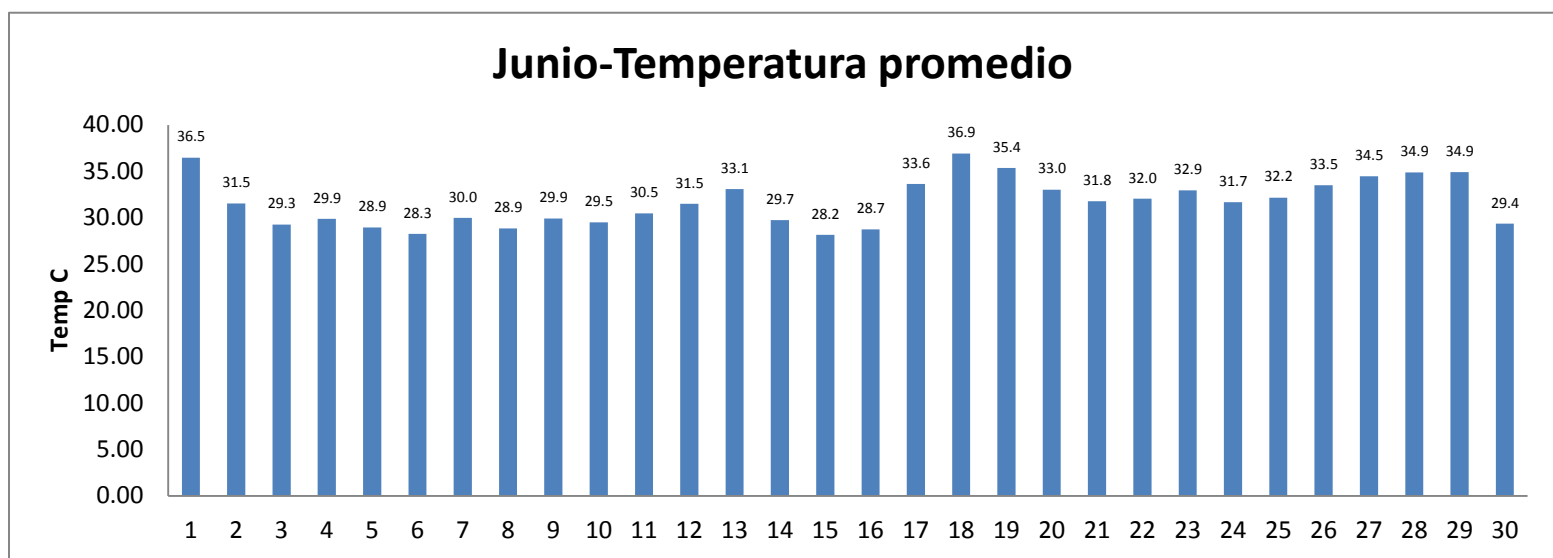


Figura 4.12 – Temperatura promedio diaria en el mes de Junio

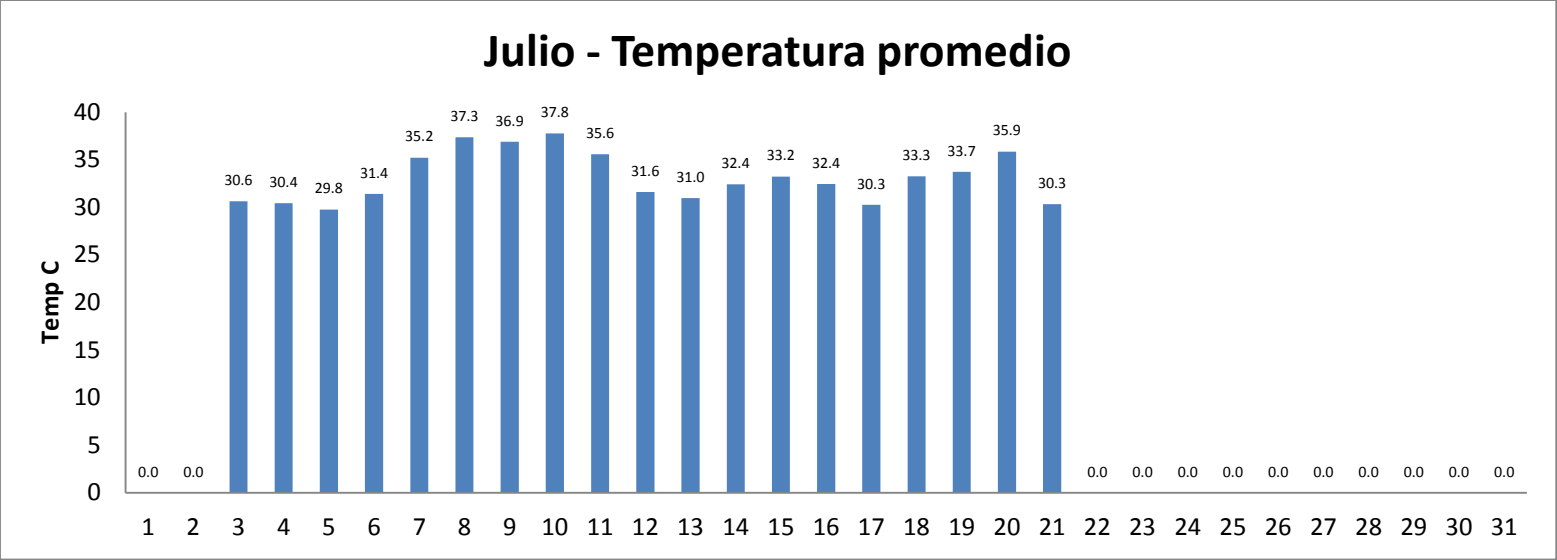


Figura 4.13 – Temperatura promedio diaria en el mes de Julio

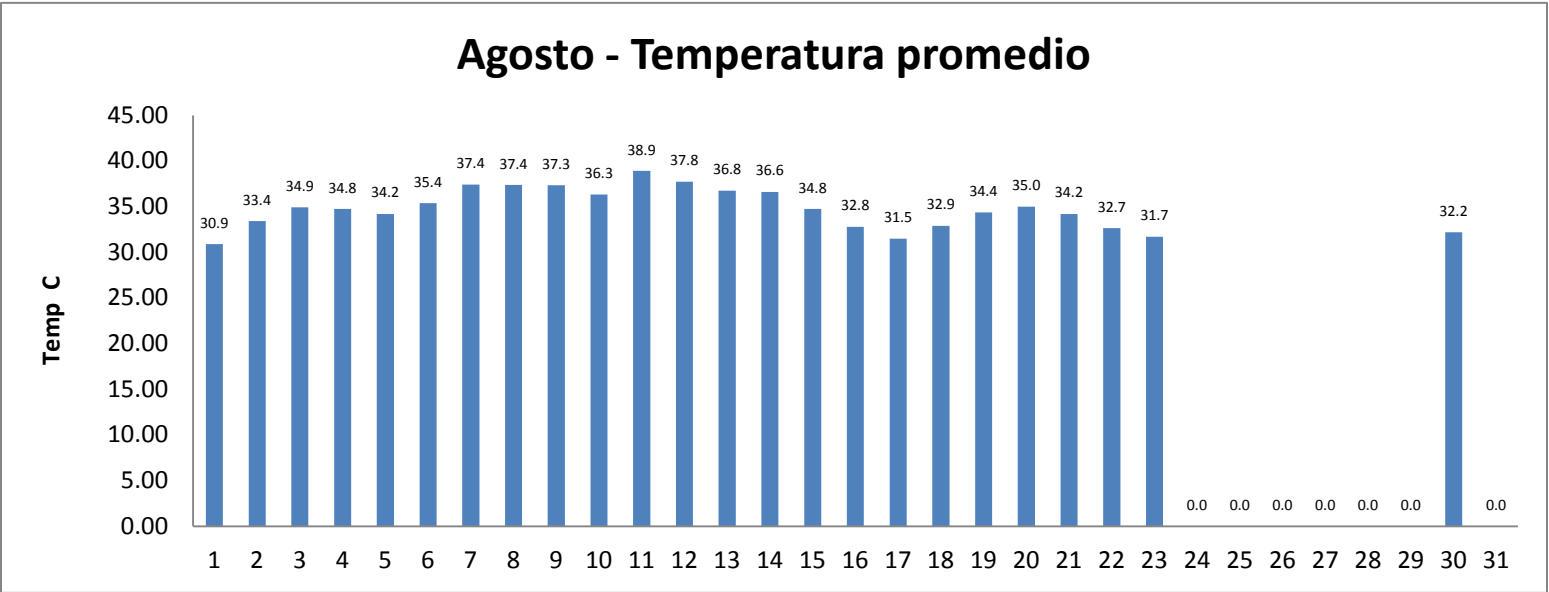


Figura 4.14 – Temperatura promedio diaria en el mes de Agosto

4.3.3 – Irradiación Solar

En las figuras 4.15 a 4.20 se presentan los valores de irradiación solar total incidente diaria registrados en el lugar de instalación y obtenidos para cada mes de verano (periodo Marzo-Agosto 2012). Los días con un valor de cero corresponden a días de los que no se tiene información de irradiación solar.

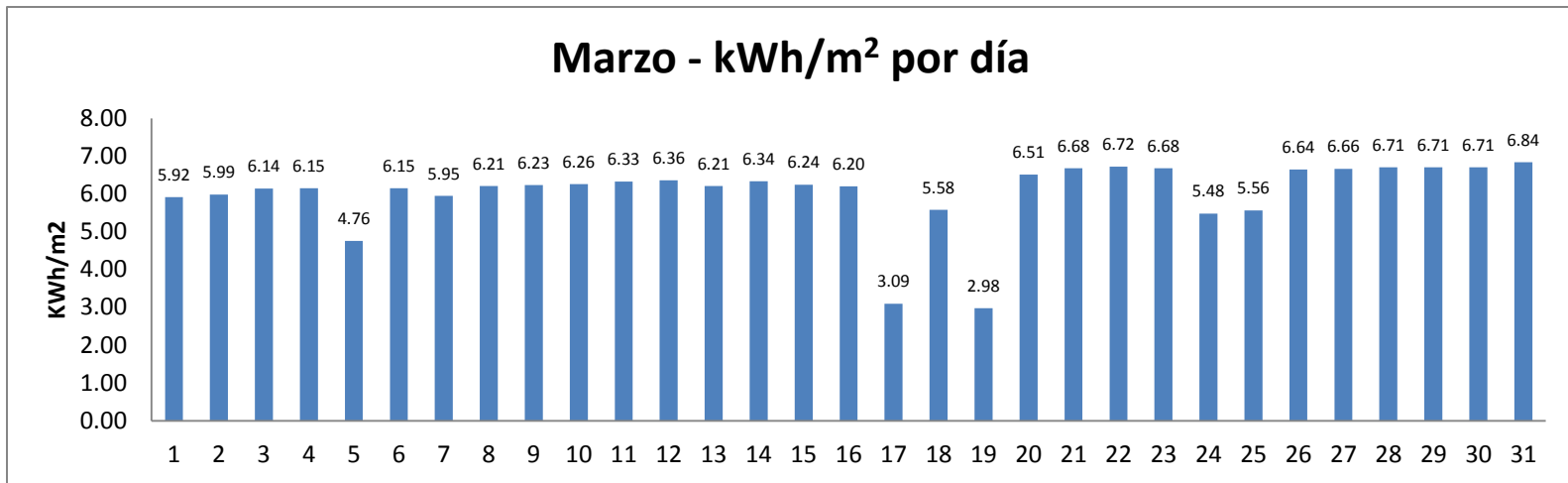


Figura 4.15 – kWh/m² totales diarios recibidos en el mes de Marzo

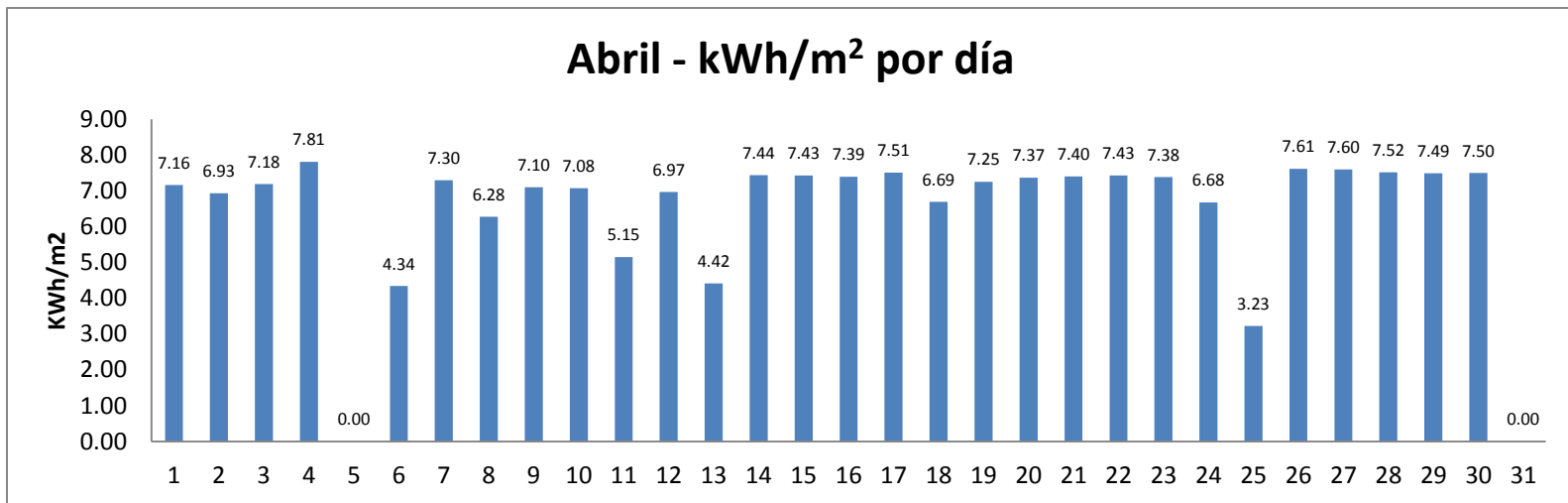


Figura 4.16 – kWh/m² totales diarios recibidos en el mes de Abril

Mayo - kWh/m² por día

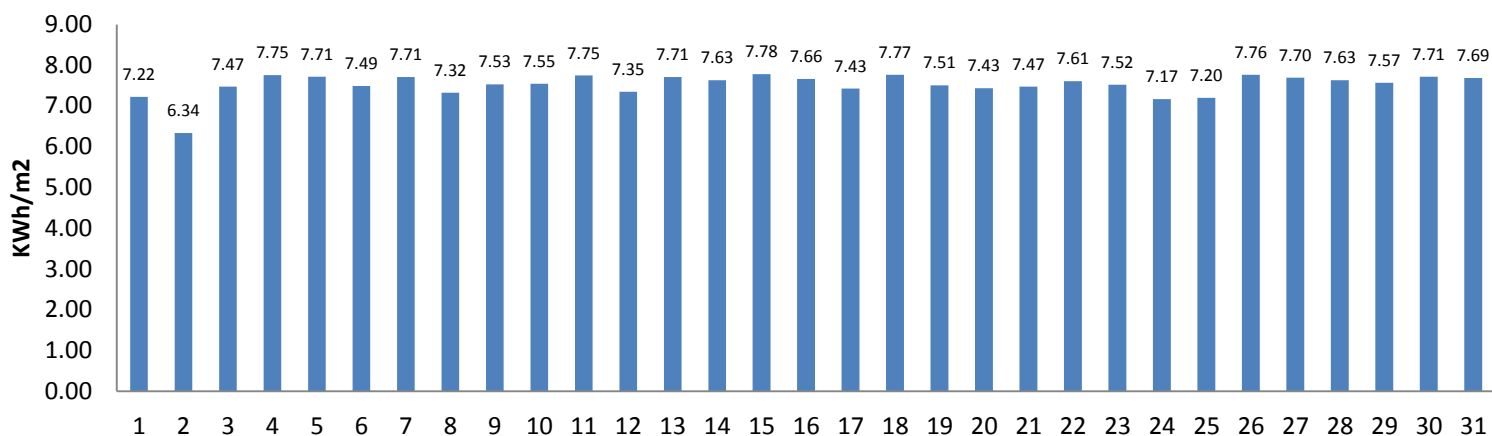


Figura 4.17– kWh/m² totales diarios recibidos en el mes de Mayo

Junio - kWh/m² por día

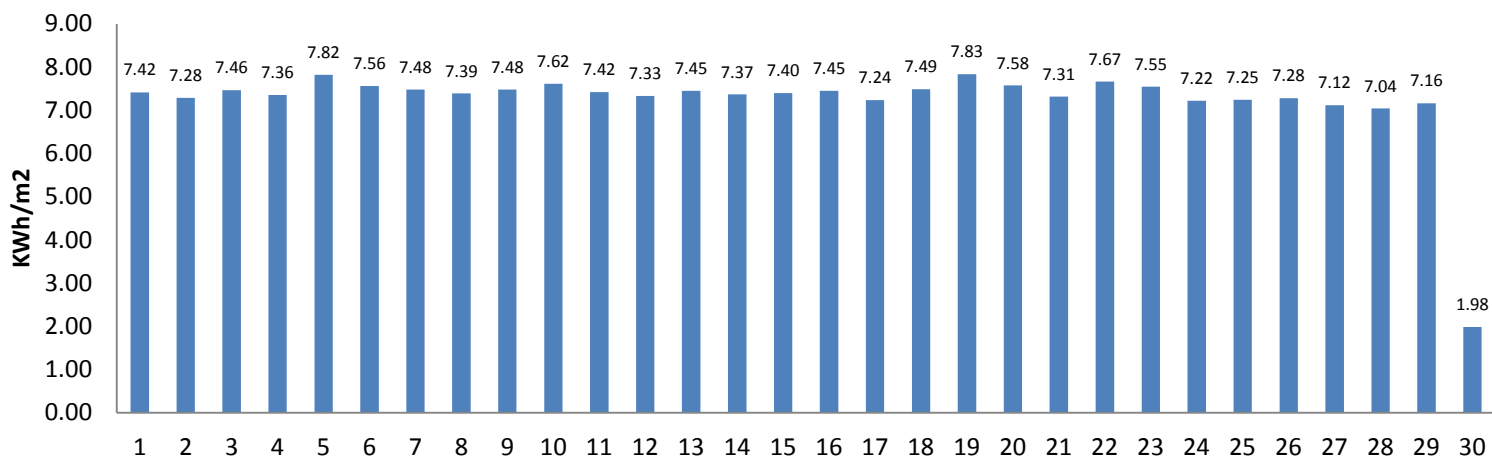


Figura 4.18 – kWh/m² totales diarios recibidos en el mes de Junio

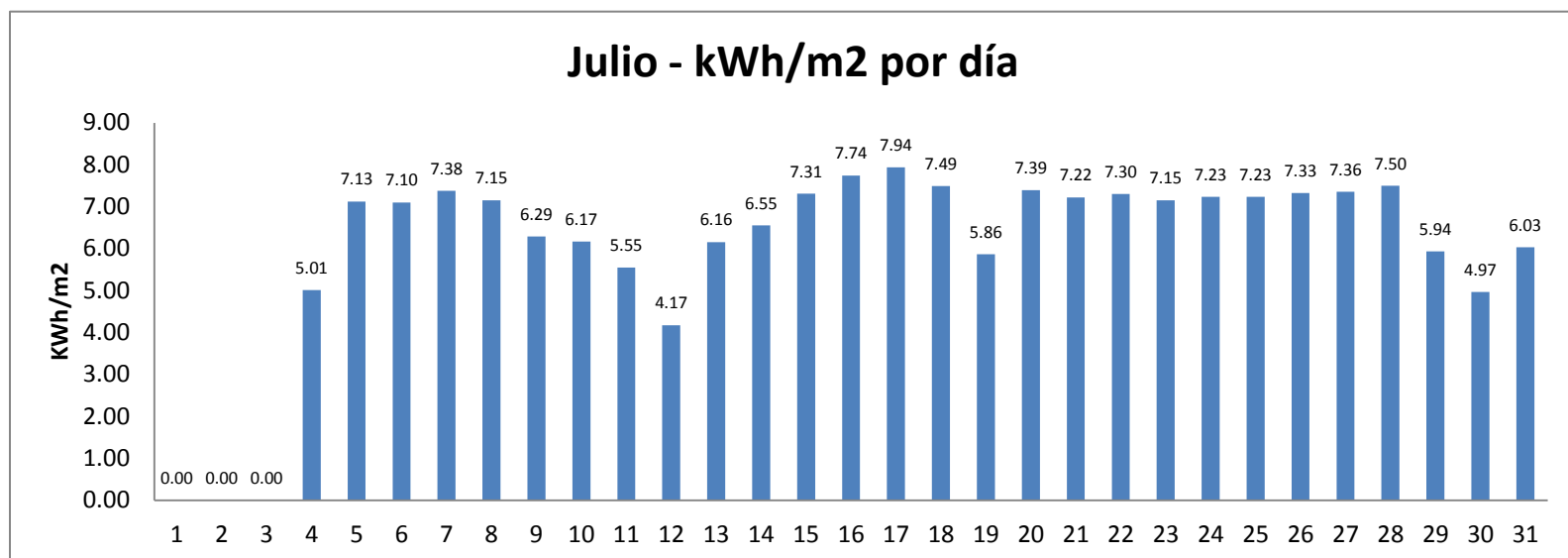


Figura 4.19 – kWh/m² totales diarios recibidos en el mes de Julio

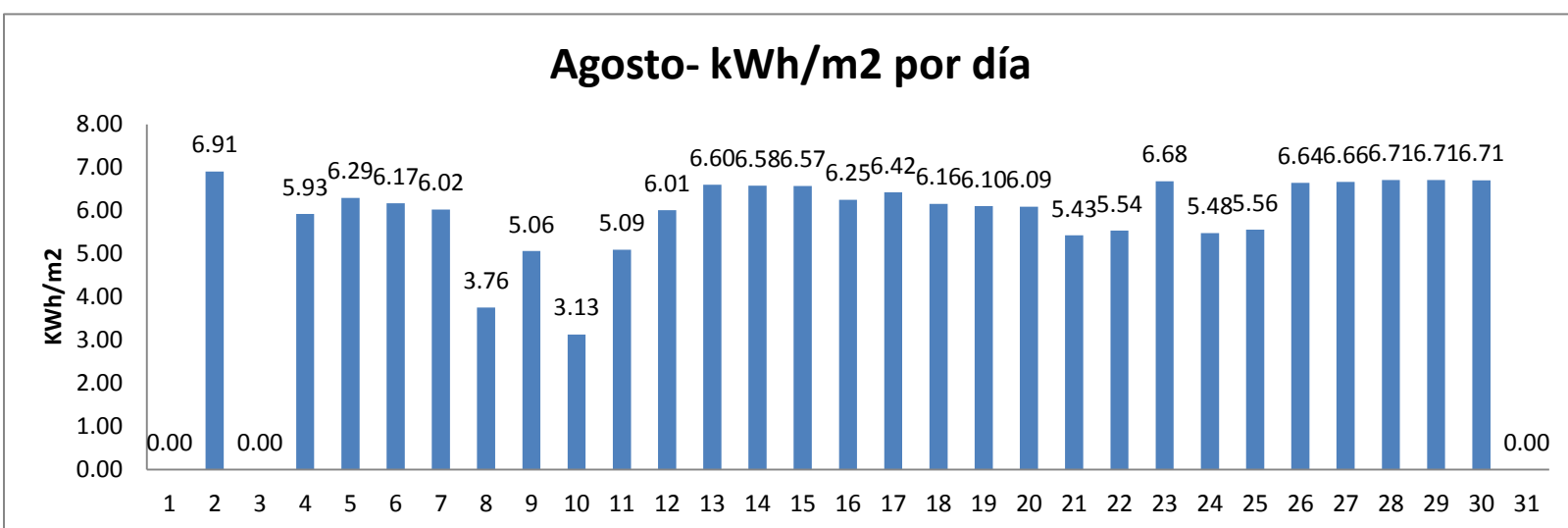


Figura 4.20 – kWh/m² totales diarios recibidos en el mes de Agosto

Como se observa, a medida que avanzan los meses de verano, se presentan más días sin registro de mediciones. Los meses de junio, julio y agosto, presentan un número significativo de días sin lectura de datos. Esto puede relacionarse al incremento de la irradiación y temperatura del lugar de instalación, lo que ocasionó que los sistemas de medición o el inversor fotovoltaico dejaran de funcionar correctamente. Pueden observarse también, días en que las lecturas de irradiación solar y temperatura presentan valores más

bajos que el resto de datos, los cuales se deben a días nublados, o posibles sombreados que afectaran la medición de estas variables.

Asimismo, el mes de julio presenta un sesgo de información significativo, lo cual no hace posible que pueda ser tomado en cuenta para obtener resultados consistentes del comportamiento de las variables monitoreadas.

En la Figura 4.21 se presentan los valores promedio mensuales de los meses de verano para las variables de irradiación solar y energía generada que permiten observar la relación que tienen estos parámetros.

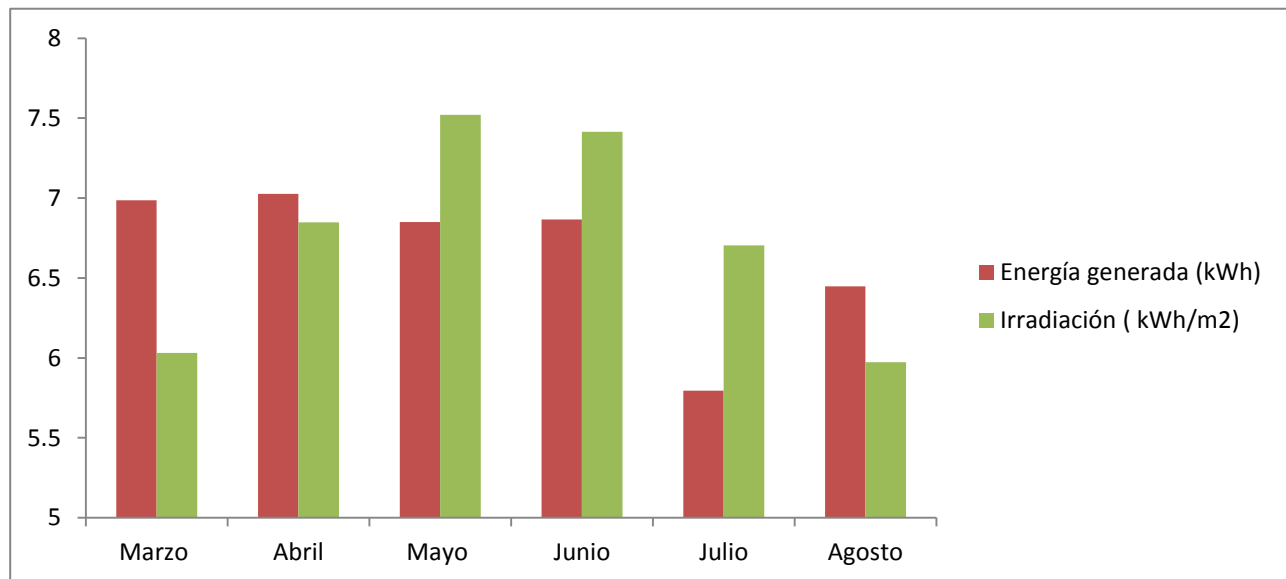


Figura 4.21 – Valores promedio mensuales de energía generada e irradiación solar

Puede observarse que los meses en los que se registran valores de irradiación solar altos presentan a su vez, valores de energía producida por el sistema más bajos, lo que lleva a inferir que el incremento de la temperatura de los módulos fotovoltaicos asociada a una mayor irradiación, disminuye su eficiencia de conversión y así mismo esta temperatura afecta el comportamiento de los inversores, los dos aspectos anteriores, se reflejan en una baja del rendimiento del sistema.

Capítulo 5

Análisis estadístico de datos

5.1 Introducción

Una planificación energética precisa de un sistema de generación distribuida requiere el conocimiento adecuado de la capacidad de la fuente de energía renovable. Cuando una planta fotovoltaica está involucrada, la capacidad de la fuente se correlaciona estrictamente con las características del lugar de instalación, especialmente con la radiación solar, ya que es proporcional a la entrega de energía eléctrica por parte del panel fotovoltaico.

Por lo general, la caracterización de una planta de energía fotovoltaica se basa en un muestreo de tiempo prolongado de los parámetros principales (Temperatura de panel, radiación solar, potencia y energía suministrada a la red, etc.). De tal manera es posible la construcción de bases de datos de las cuales, es posible extraer la información de interés.

El desarrollo de herramientas de análisis para la estimación de la cantidad de energía eléctrica generada por una instalación fotovoltaica en una escala de tiempo puede resultar útil. En particular, la posibilidad de descubrir a partir de las observaciones experimentales eléctricas y climáticas, los datos importantes para caracterizar el sitio de la instalación desde el punto de vista de la capacidad de energía generada.

La potencia de un sistema fotovoltaico se puede calcular a partir de mediciones de datos meteorológicos tales como la irradiación, la temperatura ambiente y velocidad del viento. Estas mediciones climáticas se obtienen generalmente como promedios sobre intervalos de tiempo que van desde unos pocos segundos hasta intervalos por hora.

En este trabajo se presenta el análisis de variables climatológicas como la temperatura y la irradiación solar durante los seis meses más calientes del año en la región de Mexicali, Baja California con el fin de obtener una relación con la generación de energía eléctrica del sistema, que pueda describir el rendimiento global de sistemas fotovoltaicos bajo estas condiciones.

5.2 Análisis de rendimiento global

Los factores que describen los parámetros de energía para un sistema fotovoltaico y sus componentes han sido establecidos por la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) y se describe en la norma IEC 61724.

Tres de los parámetros de desempeño del estándar IEC 61724 pueden ser usados para definir el desempeño global del sistema con respecto a su producción de energía, el recurso solar disponible y el efecto de las pérdidas del sistema. Estos parámetros son: RG, Rendimiento global, Pf, Productividad Final y PR, Productividad de Referencia [17].

El rendimiento global (RG), es un parámetro que indica qué tan eficientemente se utiliza la energía solar potencialmente disponible en un sistema fotovoltaico. Cuanto mayor es el RG, mejor utiliza el sistema la energía solar incidente. Un valor bajo de RG significa pérdidas de producción debido a problemas técnicos o de diseño.

La ecuación matemática que rige el cálculo del rendimiento global (RG) en sistemas fotovoltaicos conectados a red es el siguiente [22]:

$$RG = P_f / P_R \text{ (Ec. 1)}$$

Siendo:

$$P_f = EPV / P_o \text{ (Ec. 2)}$$

Donde EPV es la energía generada (kWh) en función de la radiación incidente sobre el plano inclinado, de la eficiencia de los módulos y de las pérdidas de los componentes del sistema y del comportamiento del inversor y Po es la potencia pico nominal (kWp) de los paneles que generan esa energía, y

$$P_R = H_i / GSTC \text{ (Ec. 3)}$$

en el que Hi es la irradiación diaria media (kWh/m²) sobre el plano del generador fotovoltaico, GSTC es la irradiación de referencia según condiciones STC, en este caso 1 kW/m².

Según especificaciones del fabricante, los 6 paneles Kyocera KD210GX-LP instalados, tienen una potencia pico nominal de 210 Watts

Por lo tanto

$$\text{Potencia pico de arreglo} = (210 \text{ W}) * 6 = 1260 \text{ Wh} = 1.26 \text{ kWh}$$

Como P_o y G_{STC} son parámetros constantes la relación del RG queda:

$$RG = (G_{STC}/P_o)(EPV/H_i) = (1\text{kWh/m}^2 / 1.26 \text{ kWh})(EPV/H_i) = 0.793(EPV/H_i) \text{ (Ec. 4)}$$

Debido a que el parámetro H_i representa la irradiación solar incidente sobre el plano inclinado, y los datos que se obtuvieron de las mediciones del sistema corresponden a valores de irradiación solar en el lugar de instalación, fue necesario obtener un factor para cada mes que representara la relación entre la irradiación sobre el plano inclinado (en este caso una inclinación de 26°) y la irradiación solar sobre un plano horizontal, obtenida de las mediciones.

Para obtener esta relación se utilizó el paquete de cómputo RETScreen [23] que permite calcular los valores de irradiación sobre un plano inclinado a partir de valores de irradiación medidos en el lugar de instalación. En la tabla 5.1 se presentan los valores promedio mensuales de irradiación sobre el plano horizontal, sobre el plano inclinado (26°) y la relación entre estos valores.

Tabla 5.1 Valores de irradiación horizontal (kWh/m^2), plano inclinado y relación mensual

	Irradiación Medida	Irradiación 26°	Relación
Marzo	6.032	6.980	1.157
Abril	6.849	7.050	1.029
Mayo	7.520	7.120	0.946
Junio	7.414	6.780	0.914
Julio	6.703	6.250	0.932
Agosto	5.974	5.920	0.990

Utilizando los datos de generación de energía fotovoltaica del sistema y la irradiación que recibe cada uno de los paneles fotovoltaicos instalados se calcularon los RG de cada día perteneciente a los meses de verano, los cuales se presentan en las figuras 5.1 a 5.6:

Marzo - Rendimiento Global

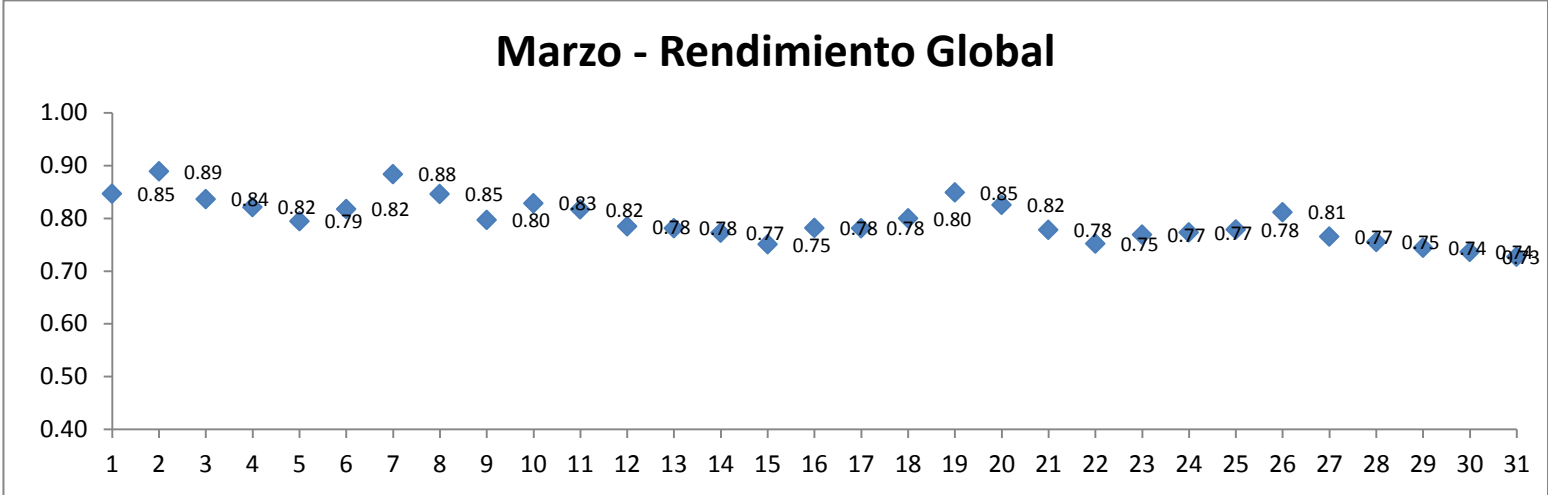


Figura 5.1 – Rendimiento Global del sistema en Marzo 2012

Abril - Rendimiento Global

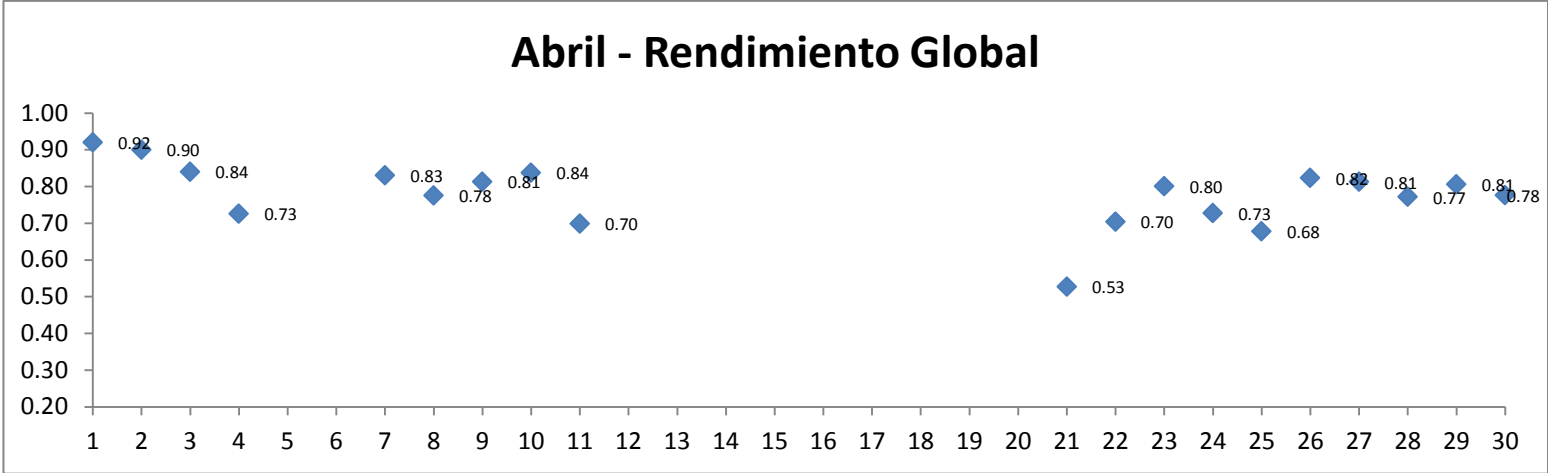


Figura 5.2 – Rendimiento Global del sistema en Abril 2012

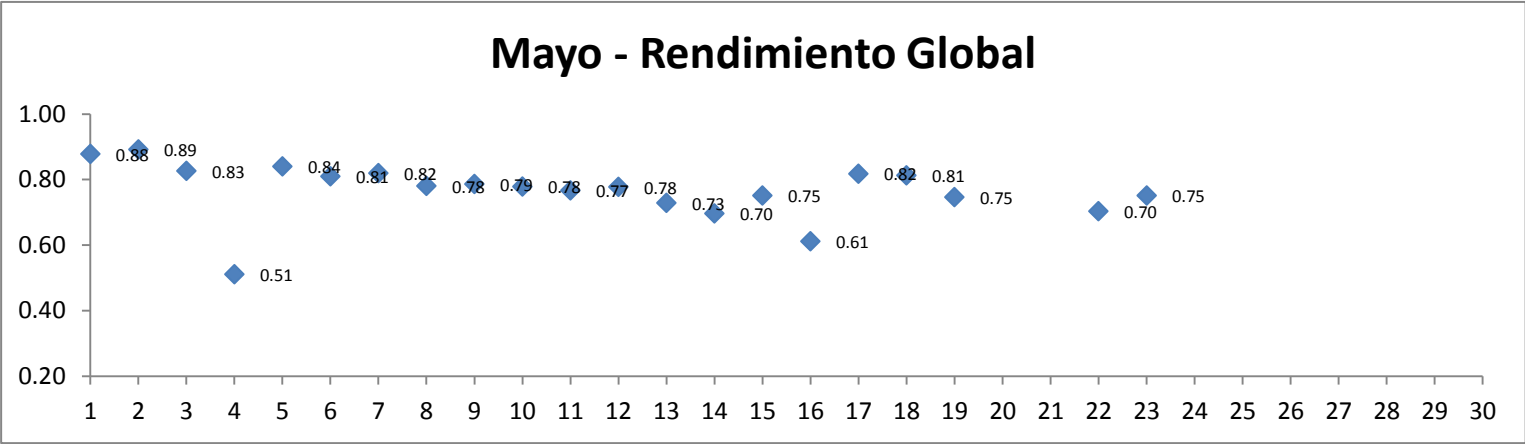


Figura 5.3 – Rendimiento Global del sistema en Mayo 2012

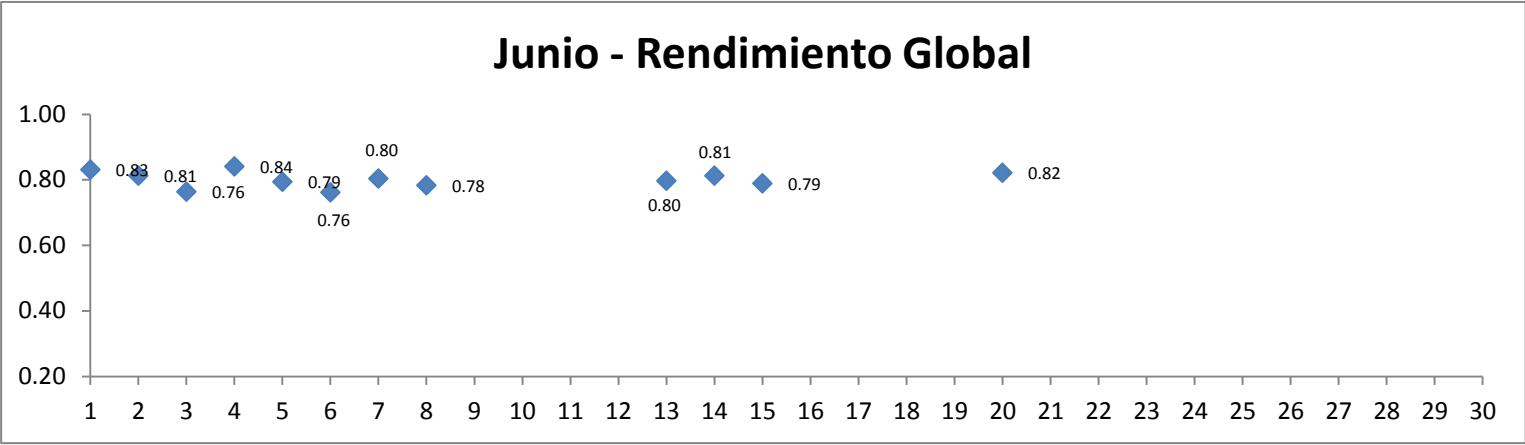


Figura 5.4 – Rendimiento Global del sistema en Junio 2012

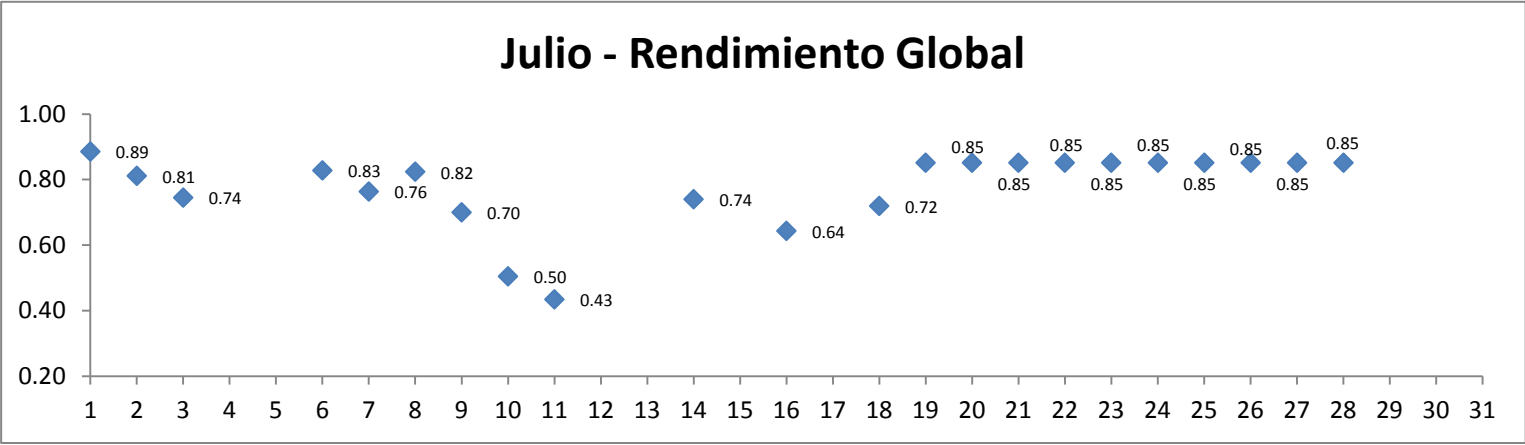


Figura 5.5 – Rendimiento Global del sistema en Julio 2012

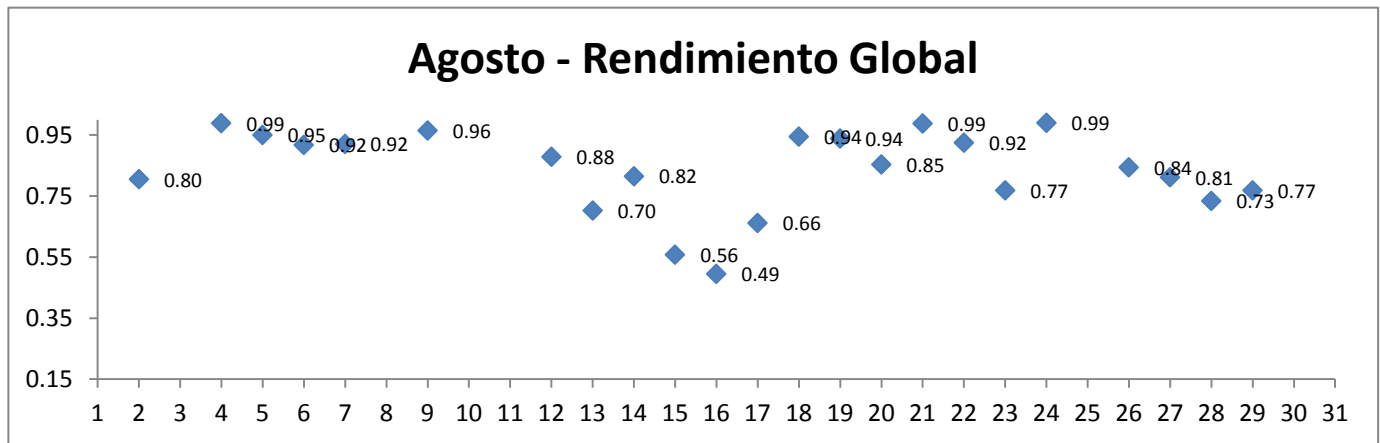


Figura 5.6 – Rendimiento Global del sistema en Agosto 2012

Como puede observarse el valor del rendimiento global a lo largo de los meses oscila entre 0.7 y 0.95 aproximadamente, lo que nos indica que el desempeño general del sistema presenta un valor aceptable.

El mes de julio presenta una inconsistencia en los últimos días, pues tienen un valor de rendimiento global constante (0.85). Esto se debe al sesgo significativo de información de las variables monitoreadas para ese mes específico, lo cual puede ser causado por las altas temperaturas que se presentaron, provocando fallos en el sistema fotovoltaico.

5.3 Análisis de medias, desviación estándar y varianza

Para hacer un correcto análisis de los datos monitoreados, es necesario obtener el valor promedio mensual de cada variable (temperatura ambiente, irradiación solar, energía generada y rendimiento global) y posteriormente calcular la desviación estándar y varianza, con la finalidad de determinar las variables estadísticamente significativas del fenómeno estudiado. En las tablas 5.2 a 5.5 se presenta esta información.

Tabla 5.2 Análisis de datos de energía generada (kWh) por el sistema

	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Media	6.98	7.02	6.85	6.86	5.79	6.44
Desviación	1.03	1.40	0.69	0.27	1.55	1.05
Varianza	1.07	1.96	0.47	0.07	2.41	1.12

Tabla 5.3 Análisis de datos de temperatura ambiente (°C)

	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Media	18.42	22.99	28.56	31.69	33.11	34.75
Desviación	2.82	3.73	3.46	2.51	2.61	2.21
Varianza	7.97	13.96	11.97	6.33	6.84	4.89

Tabla 5.4 Análisis de datos de irradiación solar (kWh/m²)

	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Media	6.03	6.84	7.52	7.41	6.70	5.97
Desviación	0.91	1.12	0.27	0.18	0.94	0.88
Varianza	0.84	1.25	0.07	0.034	0.88	0.77

Tabla 5.5 Análisis de datos de rendimiento global del sistema

	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Media	0.79	0.77	0.76	0.80	0.66	0.83
Desviación	0.04	0.24	0.086	0.0245	0.23	0.13
Varianza	0.0016	0.057	0.0074	0.0006	0.055	0.018

Se decidió hacer el análisis de experimentos a las variables de respuesta: energía generada por el sistema y rendimiento global con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre los datos de cada mes de verano. En la tabla 5.6 a 5.9 se presentan las matrices de datos utilizadas y sus ANOVAS correspondiente.

Tabla 5.6 Matriz de datos de rendimiento global, Verano 2012

Día	RG Marzo	RG Abril	RG Mayo	RG Junio	RG Julio	RG Agosto
1	0.85	0.92	0.88			
2	0.89	0.90	0.89	0.83		0.80
3	0.84	0.84	0.83	0.81	0.89	
4	0.82	0.73	0.51	0.76	0.81	0.99
5	0.79		0.84	0.84	0.74	0.95
6	0.82		0.81	0.79		0.92
7	0.88	0.83	0.82	0.76		0.92
8	0.85	0.78	0.78	0.80	0.83	
9	0.80	0.81	0.79	0.78	0.76	0.96
10	0.83	0.84	0.78		0.82	
11	0.82	0.70	0.77		0.70	
12	0.78		0.78		0.50	0.88
13	0.78		0.73		0.43	0.70
14	0.77		0.70	0.80		0.82
15	0.75		0.75	0.81		0.56
16	0.78		0.61	0.79	0.74	0.49
17	0.78		0.82		0.00	0.66
18	0.80		0.81		0.64	0.94
19	0.85		0.75			0.94
20	0.82				0.72	0.85
21	0.78	0.53		0.82	0.85	0.99
22	0.75	0.70	0.70		0.85	0.92
23	0.77	0.80	0.75		0.85	0.77
24	0.77	0.73			0.85	0.99
25	0.78	0.68			0.85	
26	0.81	0.82			0.85	0.84
27	0.77	0.81			0.85	0.81
28	0.75	0.77			0.85	0.73
29	0.74	0.81			0.85	0.77
30	0.74	0.78			0.85	

Tabla 5.7 Tabla de ANOVA para rendimiento global

Fuente	GL	SC	MC	F	F(.05,5,115)
Factor	5	0.2738	0.0548	2.58	2.29320456
Error	115	2.4406	0.0212		
Total	120	2.7144			

Tabla 5.8 Matriz de datos de energía generada (kWh), Verano 2012

Día	Energía Marzo	Energía Abril	Energía Mayo	Energía Junio	Energía Julio	Energía Agosto
1	7.3	8.541	7.568			7.481
2	7.755	8.092	6.745	6.968	6.383	6.942
3	7.485	7.824	7.364	6.979	5.988	7.25
4	7.357	7.345	4.725	6.465	5.213	7.312
5	5.507	6.05	7.728	7.567	6.783	7.464
6	7.33	7.999	7.228	6.913	6.215	7.072
7	7.659	7.859	7.529	6.553		6.92
8	7.658	6.309	6.815	6.836		6.965
9	7.24	7.483	7.062	6.743	6.114	6.095
10	7.563	7.685	7.007		5.531	7.068
11	7.53	4.667	7.088		5.368	6.876
12	7.275		6.815		3.431	6.591
13	7.072		6.701		3.649	5.794
14	7.136		6.34	6.758	3.344	6.694
15	6.826		6.97	6.92	1.362	4.572
16	7.059		5.593	6.765		3.859
17	3.521		7.244		6.9	5.302
18	6.498		7.53			7.265
19	3.683		6.679		4.43	7.146
20	7.83					6.488
21	7.572	5.06		6.916	6.103	6.689
22	7.366	6.786	6.376		7.303	6.388
23	7.484	7.664	6.74		7.154	6.407
24	6.174	6.299			7.234	6.768
25	6.313	2.838			7.233	6.959
26	7.856	8.127			7.33	6.998
27	7.433	8.006			7.358	6.747
28	7.381	7.526			7.497	6.145
29	7.274	7.827			5.939	6.439
30	7.191				4.972	2.675

Tabla 5.9 Tabla de ANOVA para energía generada

Fuente	GL	SC	MC	F	F(0.05,5,135)
Factor	5	27.37	5.47	4.26	2.281304677
Error	135	173.38	1.28		
Total	140	200.75			

Para el análisis de ANOVA de rendimiento global del sistema se obtuvo un valor de F de 2.58, contra un valor de 2.2813. Al ser F más grande con respecto a F(0.05, 5, 115) se puede argumentar que existe una diferencia significativa entre los rendimientos globales registrados para cada mes.

Del mismo modo, para el análisis de ANOVA de energía generada por del sistema se obtuvo un valor de F de 4.26, contra un valor de 2.2813. Por lo que, se puede argumentar que existe también una diferencia significativa entre la energía generada por el sistema para cada mes.

Obteniendo este resultado puede concluirse que a medida que avanzan los meses de verano y las condiciones de temperatura e irradiación aumentan, la energía generada por el sistema y por lo tanto su eficiencia se ven afectadas.

Capítulo 6

Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

La energía solar fotovoltaica es en la actualidad una de las opciones más relevantes para la resolución de los problemas energéticos y medioambientales en México, en especial en la ciudad de Mexicali, Baja California con una alta incidencia solar durante la época de verano. Sin embargo, no existe una adecuada legislación para esta industria prometedora, que podría ser la punta de lanza en lo que respecta al uso de fuentes alternas de energía renovable en nuestro país.

En este trabajo de investigación, se efectuó el análisis de datos recolectados durante el monitoreo de un sistema fotovoltaico de 1.26 kW para uso residencial, instalado en fraccionamiento Coral Maya ubicado en la ciudad de Mexicali, Baja California, las características del sistema utilizado son los siguientes: Arreglo fotovoltaico conformado por 6 paneles de 210 Watts de potencia, inversor fotovoltaico conectado a la red, sistema de adquisición de datos para variables eléctricas y estación meteorológica.

Se analizó la información recolectada para el periodo de Marzo-Agosto del 2012, debido a que se consideró que son los meses de mayor incidencia solar en la ciudad de Mexicali, B.C., las variables monitoreadas principalmente fueron las siguientes: Temperatura ambiente en el lugar de instalación, irradiación solar sobre el arreglo fotovoltaico y energía generada por el sistema.

A partir de dicha información se observó lo siguiente:

- Los mayores datos de generación registrados corresponden al mes de Marzo, oscilando estos entre 6 y 7 KWh promedio diarios.
- Los mayores valores de irradiación solar corresponden al mes de Junio con un valor promedio de 7.41 KWh/m²

- Los datos de temperatura máximas mensuales registradas (monitoreadas) correspondieron al mes de Julio, oscilando estas entre los 30 y los 38 grados centígrados.
- Se efectuó el cálculo del rendimiento global (performance ratio), para lo cual fue necesario determinar la relación entre la irradiación diaria media sobre el plano del generador fotovoltaico y la energía generada por el sistema.
- Los datos de rendimiento global (performance ratio), se presentaron en forma mensual, oscilando los mismos entre 0.7 y 0.95; sin embargo los valores mayores correspondieron al mes de Marzo.
 - ✓ Como se puede observar del análisis de los datos, el valor promedio de rendimiento global del sistema en los meses de verano fue de .771 el cual es un valor similar al .80 reportado en la literatura para sistemas fotovoltaicos similares [22]
 - ✓ Los valores bajos de PR calculados para los meses de mayor irradiación se pueden deber a las causas siguientes:
 - a) Sistema fotovoltaico inadecuado para trabajar en condiciones extremas
 - b) Fallos en el inversor al momento de realizar la conversión de energía
 - c) Fallos en el sistema de adquisición de datos, que resulte en falta de datos para realizar un análisis detallado.
- Se debe señalar que la ausencia de datos monitoreados no permitió en algunos casos la determinación del RG, principalmente en los meses de, junio, julio y agosto del 2012.

- Se efectuó un análisis de ANOVA para las variables de energía generada y rendimiento del sistema, del cual se concluyó que existen diferencias significativas entre cada mes de verano.
- Las altas temperaturas e irradiación solar son variables que afectan el rendimiento de un sistema fotovoltaico, pues los meses que presentaron mayor irradiación, presentaron también valores más bajos de rendimiento en el sistema fotovoltaico.

Para trabajos futuros se recomienda:

- Monitorear la temperatura en la resistencia térmica de los paneles fotovoltaicos y en el inversor, para obtener el impacto real que la temperatura tiene sobre en la eficiencia del sistema.
- Monitorear la entrada y la salida del inversor fotovoltaico para obtener la eficiencia del inversor al momento de convertir la energía generada por el arreglo fotovoltaico.

Bibliografía

- [1] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2010*, www.iea.org, 2010.
- [2] Antonio Luque and Steven Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, JOHN WILEY & SONS, Pág.33-34, Delaware USA 2011.
- [3] Zhao Y, Wang S, Li X, Wang W, Liu Z, Song S. *China renewable energy development project. Report on the development of the photovoltaic industry in China*. NDRC/GEF/WB, August; 2006.
- [4] Serie Ponencias, Fundamentos, CIEMAT, *Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica*. Madrid 2005.
- [5] IEA, "Country Reports on PV Systems Performance"; *Photovoltaic Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T2-05*; 2004. [online] www.iea-pvps.org.
- [6] Prosolar-SENER "Programa de Fomento de Sistemas Fotovoltaicos en México"; México 2012. http://www.renovables.gob.mx/res/Informe%20ProSolar_Color.pdf [online]
- [7] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. "Ubicación de México en el mundo" <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/datosgeogra/acercamexico/mexmun.cfm?s=geo&c=916>
- [8] Pavón Mario, *Tecnologías de energía renovable aplicables a usuarios de menores ingresos en Mexicali; sus impactos económicos y sociales, y los principales obstáculos para su implementación*, ENERGÍA BC, Mexicali 2011.
- [9] Fernández Salgado José María, *Compendio de energía solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica*, EDICIONES MUNDI-PRENSA, Madrid 2010.
- [10] Rodríguez Ortega Mario, *Energías Renovables*, EDITORIAL PARANINFO, 2da Edición, Madrid 2002.
- [11] Ormaechea Ballesteros, Clara, *Análisis comparativo de inversores fotovoltaicos de conexión a red con potencia igual o superior a 100 kw*, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España 2012.
- [12] Norma UNE-EN 50524: *Información de las fichas técnicas y de las características de los inversores fotovoltaicos*. España 2010.

- [13] GTM Research, *GROWTH, MARKET SHARE AND DYNAMIC CHANGE IN THE PV INVERTER INDUSTRY*, Septiembre 2009 [online] www.greentechmedia.com
- [14] <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4506/2/fotovoltaica.pdf>
- [15] IDAE: Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía. *Plan de Energías Renovables 2011-2020 (PER)*.
- [16] Chanchlani, Gitika (2011), "Global Concentrated Photovoltaic Market Growth and Investments", *Renewable World Energy*, 1 de febrero de 2012.
- [17] IEC, *'Photovoltaic System Performance Monitoring-Guidelines for Measurement, Data Exchange, and Analysis, IEC Standard 61724,'* Geneva, Switzerland.1998.
- [18] Campbell R.H.E., Pérez T.C., Lambert A.A.A., Rangel G.I., Delgado R.R., Bonilla G.D.R. Reportes Técnicos 1 a 7, "Evaluación del Comportamiento Térmico y Energético de Viviendas Construidas por Ingeniería Dennis S.A. de C.V." Convenio Específico con la Universidad Autónoma de Baja California, Proyecto Número 140144 INNOVAPYME CONACYT. Mexicali, B. C. Julio de 2012
- [19] Manual de especificaciones, Panel fotovoltaico KD210GX-LP, Kyocera Corporation.
- [20] Manual de especificaciones Sunnyboy SB 1100 / SB 1700, SMA Solar technology AG
- [21] Comisión Estatal de Energía de Baja California, Proyectos instalados <http://www.energiabc.gob.mx>
- [22] Performance ratio, Quality factor for the PV plant, SMA Solar Technology AG, Technical Information.
- [23] RETScreen International 4.1, Clean Energy Project Analysis Software, www.etscreen.net