



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA EL  
ALUMBRADO DEL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN DE LA FACULTAD  
DE INGENIERÍA DE LA UAQ”

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

**INGENIERO EN AUTOMATIZACIÓN  
INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS**

PRESENTA

JULIA MARCELA MARTÍNEZ ROBLES

DIRIGIDA POR:

M.C. JOSÉ LUIS AVENDAÑO JUÁREZ

C.U. SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO. MARZO DE 2014



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería en Automatización  
Instrumentación y Control de Procesos

**“Implementación de un sistema de celdas fotovoltaicas para el alumbrado del Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería de la UAQ”**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el título de

Ingeniero en Automatización  
Instrumentación y control de Procesos

**Presenta:**

Julia Marcela Martínez Robles

**Dirigido por:**

M.C. José Luis Avendaño Juárez

**SINODALES**

M.C. José Luis Avendaño Juárez  
Asesor

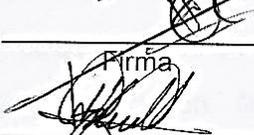
Dr. Gonzalo Macías Bobadilla  
Sinodal

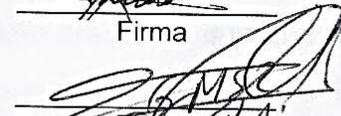
Dr. Jesús Roberto Millan Almaraz  
Sinodal

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa  
Sinodal

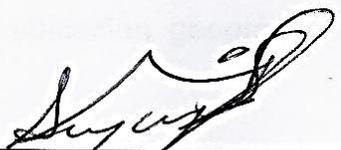
Ing. Roberto García Romero  
Sinodal

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad

Centro Universitario  
Santiago de Querétaro, Qro.  
Marzo 2014  
México

## RESUMEN

Las energías renovables son la alternativa del futuro frente a las energías convencionales, debido a que su impacto ambiental es mínimo y porque son una fuente de energía continua e inagotable. En México, el consumo de energéticos contribuye con el 61% de las emisiones de gases de efecto invernadero; el país ocupa el lugar número 13 a nivel mundial en cuanto a las emisiones de estos gases.

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). El proyecto se enfocó en la implementación de un Sistema Fotovoltaico (FV) interconectado a la red eléctrica. El primer objetivo fue realizar las adecuaciones necesarias para las instalaciones eléctricas del sistema Fotovoltaico apegándose a la Norma Oficial Mexicana Nom-001-SEDE-2012 de Instalaciones Eléctricas.

El sistema Fotovoltaico consta de 15 paneles FV conectados en serie con capacidad de 200W cada uno, con lo que se obtiene 3kW de potencia instalada, así como también un inversor de corriente. El sistema FV abastece un 28.2% del consumo de las lámparas instaladas en el laboratorio, esto en base al dimensionamiento del sistema que se realizó con un estudio previo de iluminación. El segundo objetivo fue realizar un estudio sobre la energía generada de los paneles fotovoltaicos utilizando la herramienta de software PVsyst donde se realizó una simulación con la ubicación geográfica, parámetros y datos de la ciudad de Querétaro.

Además se realizó un estudio de retorno de la inversión del sistema fotovoltaico y un estudio del impacto económico que tendría este trabajo en la Facultad Ingeniería de la UAQ.

## DEDICATORIAS

Doy gracias a Dios porque de ÈL eh recibido un sin fin de bendiciones.

Así mismo, por el significado que tienen en mi vida dedico este trabajo a:

A mis padres      Lupita y Paz por el invaluable apoyo que me han dado, por haberme acompañado siempre en cada uno de mis logros. Por toda la ayuda y comprensión que con tanto cariño me han brindado a lo largo de mi vida.

A mi hermano      Fernando del que estoy muy orgullosa, quien pese a tener desacuerdos algunas veces, ha sido también un gran soporte en mi vida.

A mis abuelos      Ignacio y Julia por todos los consejos y muestras de cariño que he recibido de ellos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo representa para mí una de las culminaciones de mi vida ya profesional, por lo que agradezco a aquellas personas que sin ser nombrados oficialmente, participaron en gran medida en la conclusión de este trabajo.

Al profesor Jose Luis Avendaño por su apoyo y orientación en todo momento para la realización de este proyecto y alcanzar este logro más en mi vida.

A mis maestros y asesores, por todos sus consejos y ayuda que me brindaron para poder realizar este trabajo.

A Ramón García a quien que considero una gran persona, por su apoyo incondicional en este proyecto.

A todos mis amigos a los que conocí en el transcurso de mi carrera, por todas sus muestras de apoyo que me dieron.

# INDICE GENERAL

RESUMEN.....	3
DEDICATORIAS.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
INDICE GENERAL.....	6
INDICE DE TABLAS.....	8
INDICE DE FIGURAS.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Justificación.....	13
1.2. Objetivos.....	15
1.3. Hipótesis.....	15
2. Revisión de Literatura.....	16
2.1. Energía solar.....	19
2.2. Efecto fotovoltaico.....	20
2.3. Celdas Fotovoltáicas.....	21
2.3.1. Componentes Básicos de una Celda Fotovoltáica.....	21
2.3.2. Características de una celda fotovoltaica.....	22
2.4. Panel Fotovoltáico.....	23
2.5. Tipos de Paneles Fotovoltáicos.....	24
2.6. Radiación solar.....	25
2.7. Orientación de un Panel Fotovoltáico.....	26
2.8. Ángulo de inclinación de un Panel Fotovoltáico.....	28
2.9. Temperatura de un panel Fotovoltáico.....	30
2.10. Tipos de Sistemas Fotovoltáicos.....	32
2.10.1. Sistema FV autónomo.....	32
2.10.2. Sistemas FV interconectado.....	33
2.11. Inversor.....	34
2.11.1. Tipos de Inversores.....	35
2.12. Tipos de montaje de paneles Fotovoltáicos.....	36
2.13. Mantenimiento.....	38
3. METODOLOGIA.....	40

3.1.	Diseño del sistema fotovoltaico.....	40
3.1.1.	Características específicas de la carga del Laboratorio de Automatización.....	40
3.1.2.	Cálculo del arreglo de paneles Fotovoltaicos .....	43
3.1.3.	Cálculo del ángulo de inclinación de los paneles.....	45
3.1.4.	Orientación .....	47
3.1.5.	Cálculo de las dimensiones del de la estructura de los paneles FV .....	47
3.1.6.	Especificación del inversor.....	49
3.1.7.	Dimensionamiento de los conductores .....	51
3.1.8.	Cálculo de las protecciones-interruptor.....	53
3.2.	Instalación del sistema fotovoltaico .....	55
4.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	57
4.1.	Energía Producida por el sistema Fotovoltaico .....	57
4.2.	Estudio económico del Sistema Fotovoltaico.....	60
4.2.1.	Costo del Sistema Fotovoltaico.....	60
4.2.2.	Costo de energía eléctrica con el sistema fotovoltaico implementado .....	61
4.2.3.	Retorno de la inversión.....	62
5.	CONCLUSIONES .....	65
6.	Bibliografía .....	66
7.	APÉNDICE.....	68
	APÉNDICE A – Hoja de datos técnicos del Panel Fotovoltaico .....	68
	APÉNDICE B – Datos técnicos generales del Inversor Fronius IG 3000.....	69
	APÉNDICE C – Tabla 310-15(b) (16) Capacidad permisible en conductores.....	70
	APÉNDICE D – Recibos de electricidad.....	71
	APÉNDICE E – Artículo expuesto en la VII Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de energía y educación Energética. CIER 2011-La Habana, Cuba 72	

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.6. Inclinación de acuerdo a la estación del año. ....	30
Tabla 3.1.2. Descripción del sistema fotovoltaico. ....	43
Tabla 3.1.3. Características generales y ubicación geográfica Querétaro . ....	45
Tabla 3.1.3.1. Radiación solar incidente en Querétaro y ángulo de inclinación promedio . ....	46
Tabla 3.1.5. Dimensiones del panel fotovoltaico ERDM 200S7P/6 . ....	48
Tabla 3.1.6. Menù de parámetros en inversor . ....	50
Tabla 3.1.7. Datos técnicos del panel Fotovoltaico ERDM SP/6 del sistema. ..	51
Tabla 3.7.1.1. Código de colores del cableado . ....	52
Tabla 4.1. Datos generales del sistema FV . ....	57
Tabla 4.1.1 Energía generada por el sistema FV . ....	58
Tabla 4.1.1. Comparación de energía producida a diferente inclinación . ....	59
Tabla 4.2.1 Costo total del Sistema FV . ....	60
Tabla 4.2.2. Tarifa HM (CFE) [17] . ....	61
Tabla 4.2.2.1 Ahorro de pago de energía eléctrica con sistema FV . ....	62
Tabla 4.2.3 Retorno de inversión . ....	63

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Producción de electricidad por energía solar. ....	19
Figura 2.2 Efecto Fotovoltaico. ....	20
Figura 2.3.1 Componentes Básicos de una Celda Fotovoltaica. ....	22
Figura 2.4. Terminología Fotovoltaica. ....	24
Figura 2.5. Tipos de Paneles Fotovoltaicos. ....	25
Figura 2.6. Curva de Radiación solar y horas solares pico. ....	26
Figura 2.7. Inclinación del sol a lo largo del año. ....	27
Figura 2.6.1. Orientación de un arreglo Fotovoltaico para la máxima producción anual ....	28
Figura 2.9. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de radiación (temperatura constante de 25 °C). ....	31
Figura 2.9.1 Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes temperaturas de operación (radiación constante 1,000W/m <sup>2</sup> ). ....	32
Figura 2.10.1 Sistema Autónomo. ....	33
Figura 2.10.2 Sistema conectado a la red eléctrica pública. ....	34
Figura 2.11. Inversor marca Fronius. ....	35
Figura 2.12 Montaje en tierra ....	36
Figura 2.12.1. Montaje directo. ....	37
Figura 2.12.2. Montaje por separado. ....	37
Figura 2.12.3.Montaje con seguimiento. ....	38
Figura 3.1.1. Distribución de las áreas del Laboratorio de Automatización ....	41
Figura 3.1.1.1 Distribución inicial de lámparas en el Laboratorio de Automatización. ....	41
Figura 3.1.1.2 Nueva Distribución de Laboratorio de Automatización. ....	42
Figura 3.1.2. Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico. ....	44
Figura 3.1.3. Inclinación de los Paneles FV para el Laboratorio de Automatización. ....	46
Figura 3.1.4. Brújula: sur geográfico. ....	47
Figura 3.1.5. Estructura de aluminio ....	48

Figura 3.1.6. Inversor Fronius IG 3000-LV .....	49
Figura 3.1.6.1. Instalación de inversor .....	49
Figura 3.1.7. Cableado del inversor. ....	53
Figura 3.1.8. Interruptores de DC y AC .....	53
Figura 3.1.8.1. Interruptores de AC .....	54
Figura 3.2. Montaje de sistema Fotovoltaico. ....	55
Figura 3.2.1. Sistema Fotovoltaico. ....	55
Figura 3.2.2. Canalización del cableado. ....	56
Figura 4.1. Energía producida de acuerdo a inclinación del sistema. ....	58
Figura 4.1.1. Energía (kWh/día) de cada mes durante un año .....	59
Figura 4.2.3. Periodo de retorno de la inversión .....	64
Figura 4.2.3.1 Grafica ganancia del sistema. ....	64

## 1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía disponible para la humanidad, y que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua.

La energía solar, eólica, biomasa, geotérmica, mareomotriz y la del hidrógeno son algunas de las fuentes renovables. Estas energías nos ofrecen algunas de las siguientes ventajas con respecto a los combustibles fósiles: menor impacto ambiental, generación en el lugar de consumo, mínimo riesgo en su obtención y no requiere complejos sistemas de seguridad.

El consumo de energía aumenta cada año a pesar de que los recursos energéticos son limitados. De ahí la importancia de potenciar energías renovables como la solar, que permite diferentes usos y ofrece muchas aplicaciones y ventajas respecto a la energía convencional. Nuestro país posee un importante potencial en la generación de esta energía, debido a sus favorables condiciones geográficas y climáticas, ya que tiene una alta incidencia de radiación solar en la gran mayoría de su superficie.

Los usos de la energía solar fotovoltaica pueden ser numerosos. Los sistemas aislados de la red pueden tener usos como en viviendas, bombeo, etc., mientras que en las instalaciones conectadas a la red eléctrica pública se pueden utilizar tanto para aplicaciones pequeñas así como aplicaciones a mayor volumen. El uso de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica pública es una alternativa real para los consumidores de energía eléctrica.

La electricidad generada por Energías Renovables en el 2013 representó aproximadamente un 26% de la generación total de energía eléctrica global (5,640 GW). Algunos de los factores que han impulsado la industria de Energías Renovables, en especial en los nichos de energía eólica y solar, han sido: el avance tecnológico, la disminución de costos en tecnologías, la promoción de los gobiernos para el desarrollo sustentable, entre otros factores. [1]. El crecimiento

sostenido del uso de estos sistemas a nivel mundial y en especial de los países industrializados es prueba de la madurez tecnológica y su viabilidad económica.

Por otro lado, las escuelas y universidades tienen un gran consumo de energía eléctrica ya que se debe tener un ambiente confortable de trabajo para los docentes y alumnos, así como también contar con energía para el equipo de trabajo.

El Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería de la UAQ, tiene una alta demanda de electricidad, ya que la mayor parte del día las lámparas se encuentran encendidas tanto en pasillos y aulas. Se implementó un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica que abastece el 28.2% del consumo de las lámparas instaladas en el Laboratorio. El sistema consta de 15 paneles conectados en serie con capacidad de 200W cada uno, con lo cual se produce un total de 3000 W. El dimensionamiento del sistema se realizó con un previo estudio de iluminación [2]. La instalación y cálculo del cableado del sistema se implementó de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana Nom-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas. Por otra parte se realizó un estudio sobre la energía generada de los paneles fotovoltaicos utilizando la herramienta de software PVsyst tomando los parámetros y datos de la ciudad de Querétaro, donde se simulará la energía producida por el sistema.

Finalmente, se realizó un estudio del retorno de la inversión y del impacto económico que tendrá el Sistema Fovoltáico (FV) en el Laboratorio y el ahorro que generará durante el tiempo de vida del sistema.

## 1.1. Justificación

La demanda de energía aumenta cada año a pesar de que los recursos energéticos son limitados. Hoy en día los sistemas Fotovoltaicos brindan energía a más de un millón de hogares en todo el mundo creando miles de puestos de trabajo y dando lugar a oportunidades económicamente sostenibles.

En México se han realizado diferentes trabajos relacionados a la implementación de sistemas fotovoltaicos y es uno de los temas de investigación en área de energías que más ha interesado a la comunidad científica del país.

El municipio de Querétaro es privilegiado al recibir una radiación solar promedio de  $5.9 \text{ kWh/m}^2\text{-día}$  lo que permite que sea una ciudad potencial para uso paneles fotovoltaicos en la generación de energía eléctrica.

En particular, el Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) , existe una alta demanda de electricidad en el sistema de alumbrado, debido a que la mayor parte del día las lámparas se encuentran encendidas tanto en pasillos como en las aulas. Lo que trae como consecuencia un alto costo por el pago de la electricidad utilizada.

La importancia que tiene la implementación de este proyecto estriba en los beneficios como se ha dicho sobre la reducción del consumo de energía eléctrica producida por combustibles fósiles contaminantes del medio ambiente, así como por los siguientes aspectos:

- Es una fuente inagotable de energía
- Se reduce la dependencia del petróleo y otros combustibles fósiles
- Bajos costos de mantenimiento
- Son sistemas silenciosos, limpios y no afectan el medio ambiente
- Modularidad fotovoltaica: Los módulos pueden ser añadidos gradualmente para incrementar la energía disponible.

Cabe mencionar que la inversión inicial es algo elevada, pero su retorno es de corto a mediano plazo, ya que después de recuperar lo invertido, el resto de la energía producida se considera como ganancia.

## **1.2. Objetivos**

### **- Objetivo General.**

Implementar un Sistema Fotovoltaico interconectado a la red eléctrica, que abastezca de energía eléctrica con 15.79 kW/h por día al sistema de iluminación del Laboratorio de Automatización en la Facultad de Ingeniería de la UAQ para el ahorro de energía.

### **- Objetivos particulares**

- Implementar un sistema Fotovoltaico en el Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería de la UAQ con capacidad para generar 15.79 kW/h por día
- Realizar las adecuaciones necesarias para las instalaciones eléctricas del sistema Fotovoltaico.
- Calcular la energía eléctrica producida por sistema Fotovoltaico durante su tiempo de vida
- Realizar el análisis del retorno de la inversión y del ahorro económico del sistema Fotovoltaico empleando mediciones y costos del consumo

## **1.3. Hipótesis**

Mediante la implementación de un Sistema Fotovoltaico interconectado a la red eléctrica pública se generará un ahorro energético de 40.602 kW/h por día y económico de \$176,345.43 durante los 25 años de vida del sistema FV en el Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro; además de que se puede ayudar a mejorar la calidad de la energía del sistema eléctrico en el Laboratorio utilizando energía solar limpia y renovable.

## 2. Revisión de Literatura

El sector fotovoltaico se encuentra en estos momentos a la vanguardia de las Energías Renovables. Durante los últimos años existe una conciencia mayor del aprovechamiento de los recursos naturales como fuente de energía y se ha incrementado el deseo de utilizar energías renovables para preservar el medio ambiente.

En la ciudad de Querétaro se tiene que el Aeropuerto Internacional es el primero en el País y América Latina en utilizar un sistema de generación de energía solar interconectado a la red eléctrica, que le permite reducir la utilización de combustibles fósiles. El sistema fotovoltaico es de una capacidad de 475 kW/h, interconectado a la red. Adicionalmente, con la instalación de paneles solares, en promedio el aeropuerto se ahorra alrededor de un millón 600 mil pesos anuales en facturación eléctrica [3].

Actualmente en la cafetería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro cuenta con la instalación de un “Sistema de Control y Monitoreo para Iluminación Autosustentable y de Alta Eficiencia para la Cafetería de la FI, utilizando Energías Renovables” realizado por el Dr. Gonzalo Macías Bobadilla, el cual consiste en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo que permite de manera remota acceder al estado de consumo y generación permitiendo modificar los parámetros del sistema, además, se consideró un estudio del impacto de los factores bioclimáticos en los generadores fotovoltaicos y eólicos [4].

Por otro parte, en la ciudad de México se tiene un trabajo para el ahorro de energía eléctrica de los edificios Bernardo Quintana, Valdez Vallejo DIMEI y 12 del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en el cual se remarca la importancia de conocer las condiciones y características del consumo energético así como el origen de las diversas perturbaciones que se

tienen sobre los sistemas eléctricos, y de ésta manera, contar con las herramientas fundamentales para lograr una mejor calidad y ahorro de energía [5].

La Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) con la asesoría del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), implementó un sistema fotovoltaico con una potencia de 50 kilowatts para la generación de electricidad mediante energía solar y con interconexión a la red eléctrica nacional. Así como también, la instalación e instrumentación de una planta que proporcionará electricidad a un edificio de la Unidad Iztapalapa [6]. La información que derive del estudio y la evaluación de su funcionamiento será relevante para el quehacer científico, que servirá para el desarrollo de investigaciones de energías renovables.

A nivel internacional instituciones y varias compañías han estado trabajando juntos para evaluar los límites y la competitividad de la energía fotovoltaica en España. Uno de las tareas que han llevado a cabo, ha sido pronosticar futuros escenarios de las construcciones de energía fotovoltaica conectada a la red de España, considerando tecnología, economía, sociedad y aspectos del medio ambiente. Para facilitar el análisis de los escenarios de los sistemas fotovoltaicos se desarrolló como herramienta un software, el cual analiza y compara los diferentes parámetros de un sistema [7]. Mientras que en una Planta de Generación Fotovoltaica ubicada en la provincia de Barcelona, se analizan las posibilidades que ofrece una instalación de energía solar fotovoltaica y se busca la optimización de las posibilidades del emplazamiento atendiendo a consideraciones técnicas, económicas y estéticas [8]. En el proyecto se busca la máxima integración de las instalaciones en el emplazamiento escogido, de manera que su posible afectación sea mínima.

Por otro lado, el diseño de una cubierta solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica e integrada en el taller de un edificio escolar situado en el Instituto de Enseñanza Secundaria Francisco Salinas, Salamanca, España, ha tomado como objeto de estudio las condiciones idóneas de instalación en cuanto a requerimientos constructivos previos, así como también condicionantes de

ubicación del edificio [9]. También se evaluó la sostenibilidad económica, medioambiental y social de la instalación planteada.

Cabe mencionar que en la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos, Guatemala, utilizando la modalidad de Generador Distribuidor Renovable se plantea un análisis sobre las opciones de Instalaciones de Energía Renovable por medio de paneles fotovoltaicos, para la alimentación de energía eléctrica en la iluminación del Edificio T-6 [10].

Mientras que en la Monash University, Australia, se ha instalado una amplia red de paneles solares en su campus de Clayton. El generador fotovoltaico es el más grande en cualquier universidad de Australia y es capaz de generar alrededor de 100.000 kW/h de electricidad al año. Cuenta con 416 paneles solares instalados en el techo del Centro del Campus, que alberga muchos de los establecimientos de comida, tiendas y servicios de apoyo estudiantil [11].

También en la Universidad de Golfo de Florida, Estados Unidos, se implementó uno de los arreglos solares más grandes en ese país, con un costo de 19 millones de dólares. El sistema produce 2 Mega watts por día, beneficiando a más de 2,500 estudiantes, así obteniendo una ganancia de 22 millones de dólares en un periodo de 30 años. La energía que producen los paneles solares alimenta la red eléctrica del campus. [12].

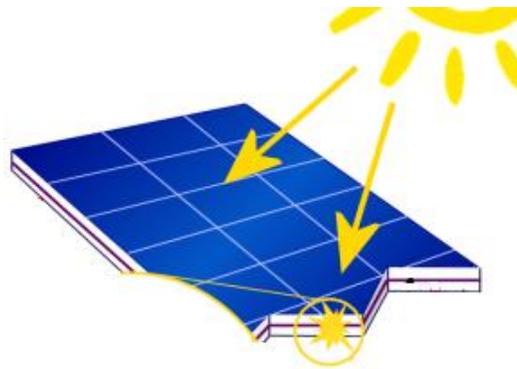
Por lo que el desarrollo e implementación de las energías renovables ha traído grandes beneficios no solo en el ahorro de costos sino en contribución del medio ambiente, cabe mencionar, que en los últimos años se ha generado un intenso interés por las aplicaciones fotovoltaicas en curso, lo que representa una promesa para esta tecnología de rápido desarrollo.

## 2.1. Energía solar

La energía solar es la potencia radiante producida por el Sol, como resultado de reacciones nucleares de fusión, que llegan a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía. Estos son llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre. Es transmitida por medio de ondas electromagnéticas presentes en los rayos solares, las cuales son generadas en forma continua y emitida permanentemente al espacio, esta energía la podemos percibir en forma de luz y calor.

La energía solar cumple un rol fundamental como fuente de vida y origen de la mayoría de las formas de energía en la tierra, además de que es una fuente de energía renovable, inagotable, limpia, sustentable y que se encuentra en todo el mundo sin dependencias externas de ningún tipo.

Una importante ventaja de la energía solar es que permite la generación de electricidad en el mismo lugar de consumo mediante la integración arquitectónica, pero para poder producirla se requiere de la utilización de dispositivos que capten la energía solar y la transformen en otra energía compatible con la demanda que se pretende satisfacer. Las diferentes tecnologías fotovoltaicas se adaptan para sacar el máximo rendimiento posible de la energía solar (Figura 2.1).



**Figura 2.1. Producción de electricidad por energía solar.**

## 2.2. Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es la base del proceso mediante el cual una celda fotovoltaica convierte la luz solar en electricidad. La luz solar está compuesta por fotones, o partículas energéticas. Cuando los fotones inciden sobre una celda fotovoltaica pueden ser reflejados, absorbidos, o pueden pasar a través de la celda. Únicamente los fotones absorbidos generan electricidad. Una celda fotovoltaica típica de silicio, como se muestra en la figura 2.2, se compone de dos partes unidas formando un emparedado.

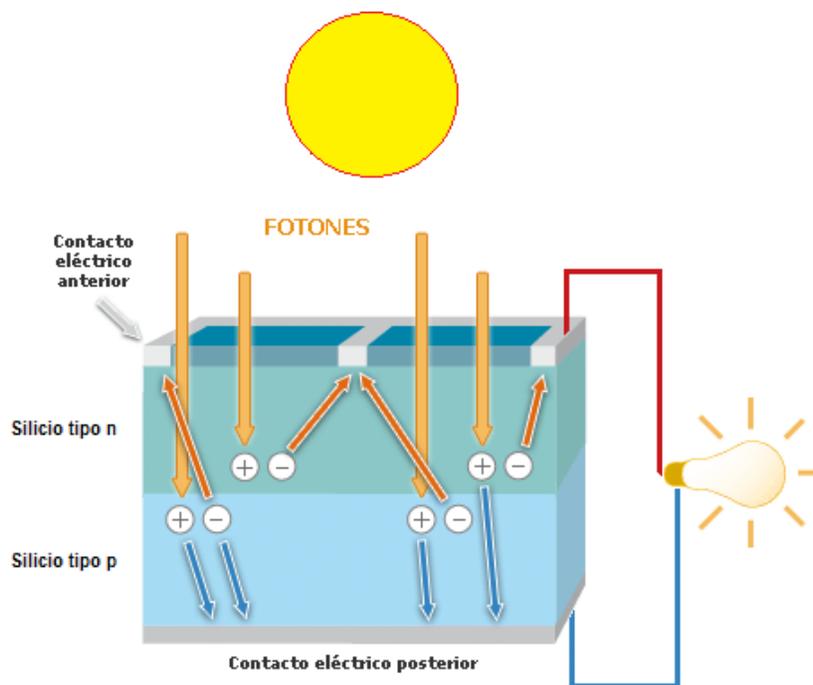


Figura 2.2 Efecto Fotovoltaico.

La parte superior de la celda es dopada o "contaminada" de manera controlada con fósforo para darle un carácter negativo o denominado tipo N. La parte posterior es dopada con boro para darle un carácter positivo o denominado tipo P. Esta diferencia de cargas forma un campo eléctrico estático entre ambas capas el cual le llaman unión. Es entonces que la luz solar o partículas, conocidas como fotones, son absorbidas en la región de la unión liberando electrones en la celda, que a la vez superan el campo eléctrico, para pasar a través de la celda. Finalmente, estos electrones recorren un circuito externo produciendo así

electricidad. Las celdas fotovoltaicas son usualmente interconectadas eléctricamente para obtener el voltaje y corriente necesarios para una aplicación dada.

### **2.3. Celdas Fotovoltaicas**

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos que convierten energía solar en electricidad, ya sea directamente vía el efecto fotovoltaico, o indirectamente mediante la previa conversión de energía solar a calor o a energía química. Aunque las celdas pueden ser hechas de diversos materiales, es el silicio en su grado de pureza electrónico el más utilizado en escala comercial.

Las celdas FV no tienen partes mecánicas, están hechas de delgadas capas de material semiconductor y son capaces de generar corrientes de 2 a 4 amperes, a un voltaje de 0.46 a 0.48Volts, tienen la propiedad de tener una gran conductividad y una ausencia total de resistividad eléctrica, están unidas a contactos de metal para completar el circuito eléctrico que se encuentran encapsuladas en vidrio o plástico. Las celdas se montan en serie sobre paneles solares para conseguir un voltaje adecuado. La capa antirreflejo aumenta la eficacia de la celda.

#### **2.3.1. Componentes Básicos de una Celda Fotovoltaica**

Los Componentes básicos de una celda FV son los siguientes:

**a) Placa de vidrio.** Es aquella que permite ingresar la luz a las celdas y protege a los semiconductores.

**b) Capa anti-reflectiva.** Es aquella que está entre la placa de vidrio y el semiconductor, y tiene la función de minimizar la pérdida de luz por reflejo.

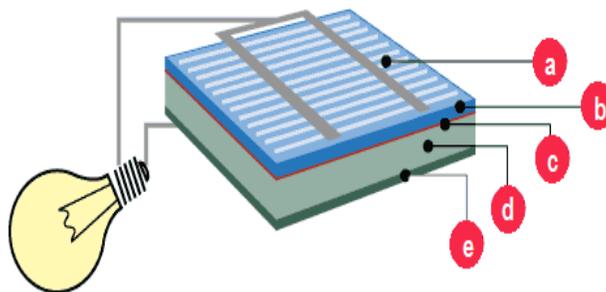
**c) La capa de semiconductor tipo n.** Es aquella que tiene una concentración de electrones excitados mayor a la de la capa tipo p, lo cual provoca que las cargas

eléctricas de esta capa se pasen a la capa de tipo p provocando una diferencia de potencial con la otra capa.

**d) Plancha de semiconductores tipo n y tipo p.** Es aquella en la que se encuentran colocados los semiconductores tipo n y tipo p y están enlazados a través de un camino o vía que actúa como conductor por el cual circulan los electrones para ir del semiconductor tipo n al tipo p, generando un campo eléctrico en este cable.

**e) La capa de semiconductor tipo p.** Es aquella que tiene una deficiencia de electrones, lo cual atrae a los electrones excitados provenientes de la capa tipo n, provocando que se genere una diferencia de potencial entre ambas capas de semiconductor, mejor conocido como voltaje.

La figura 2.3.1 muestra los componentes descritos anteriormente.



**Figura 2.3.1 Componentes Básicos de una Celda Fotovoltaica.**

### **2.3.2. Características de una celda fotovoltaica**

**a) Corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ )** Esta magnitud es la intensidad que circula con la celda en cortocircuito, con una iluminación determinada y fija. Su valor es directamente proporcional a la energía solar recibida, y por lo tanto a la superficie total y al nivel de iluminación.

**b) Voltaje de circuito abierto ( $V_{co}$ )** Esta magnitud es la diferencia de potencial entre los bornes de la celda en ausencia de consumo, con una iluminación fija y a

una temperatura determinada. Su valor depende del acoplamiento utilizado y varía muy poco con la intensidad luminosa.

**c) Corriente óptima ( $I_m$ )** Esta magnitud es la intensidad que circula por la celda en el punto de funcionamiento óptimo, aplicada una carga ( $R_m$ ) de valor óptimo, elegida de modo de que la potencia eléctrica sea máxima.

**d) Voltaje óptimo ( $V_m$ )** Esta magnitud es la tensión que origina la corriente óptima, al ser aplicada sobre una carga  $R_m$  de valor óptimo, elegida de modo de que la potencia eléctrica sea máxima.

**e) Potencia Máxima ( $P_{max}$ )** Es la máxima energía que es entregada por una celda FV cuando pasa por un valor máximo para valores determinados de tensión y corriente fijados en función de la resistencia óptima de carga ( $R_m$ ). Su unidad de medición es el Watt.

**f) Rendimiento ( $\eta$ )** Esta magnitud es la relación entre la energía eléctrica entregada y la energía luminosa recibida. Su valor ronda el 18 %, según la tecnología constructiva de la celda.

## **2.4. Panel Fotovoltaico**

Un panel fotovoltaico es un conjunto de celdas fotovoltaicas interconectadas entre sí. Un panel fotovoltaico es usado como componente de un sistema FV para ofrecer electricidad limpia y renovable tanto a la industria comercial como a la residencial. La mayoría de los paneles FV son rígidos, pero ya existen paneles flexibles basados en las celdas solares delgadas. Las conexiones eléctricas son hechas en serie para alcanzar la salida de voltaje deseada, y en paralelo para lograr la cantidad de corriente necesaria. En la figura 2.4 se muestra visualmente la terminología fotovoltaica.

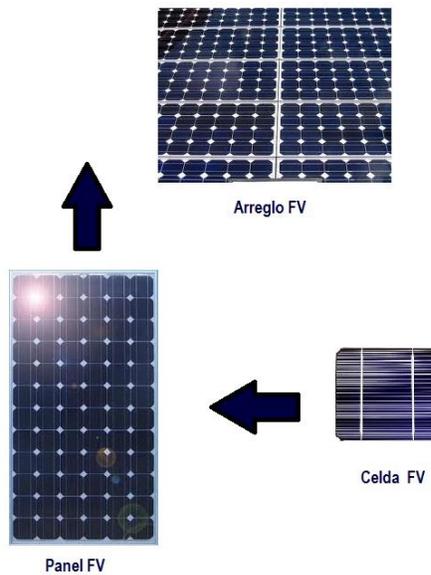


Figura 2.4. Terminología Fotovoltaica.

## 2.5. Tipos de Paneles Fotovoltaicos

Existen distintos tipos de paneles fotovoltaicos, su clasificación depende de su proceso de fabricación, ya que tienen diferente rendimiento, aplicación y precio.

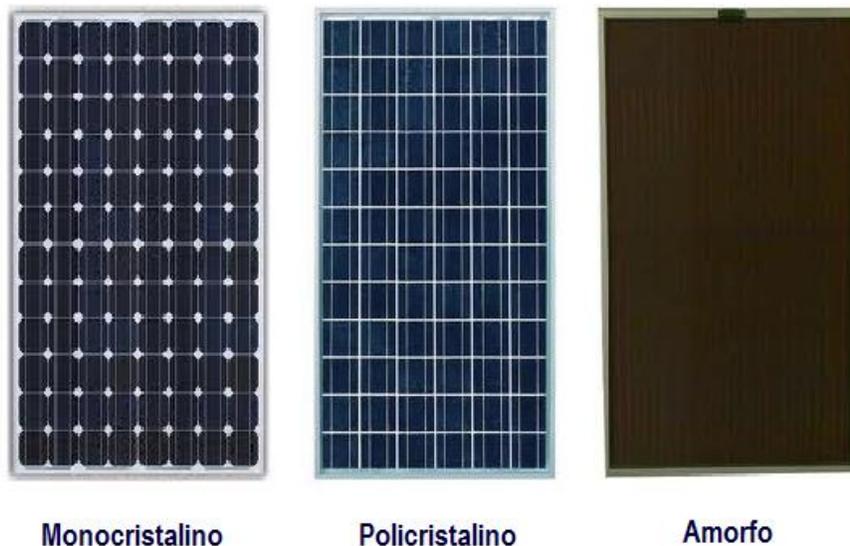
**-Celdas de Silicio cristalino:** Son las celdas que predominan hoy en el mercado mundial. Esto se debe a sus características: madurez, confiabilidad y larga vida útil (de 20 a 30 años).

**-Silicio Monocristalino:** Este tipo de celdas están hechas de un solo cristal de silicio de muy alta pureza. Los módulos con estas celdas son los más maduros del mercado, proporcionando con eso confiabilidad en el dispositivo.

**-Silicio Policristalino:** Estas son fabricadas de Silicio, mezclado con Arsenio y Galio. Son más sencillas de conseguir y tienen un rendimiento menor que las anteriores, pero no son nada despreciable. Son perfectas para lugares en los que las condiciones ambientales hagan que, la celda no se rompa aún siendo éstas muy duraderas para otras condiciones ambientales.

**-Silicio Amorfo:** Este tipo de celdas tienen baja durabilidad pero bajo costo. Su eficiencia es más baja de 6 a 10% y tiende a cero con su envejecimiento. Proporcionan una cantidad de energía muy baja.

La figura 2.5 muestra los diferentes tipos de paneles fotovoltaicos antes descritos

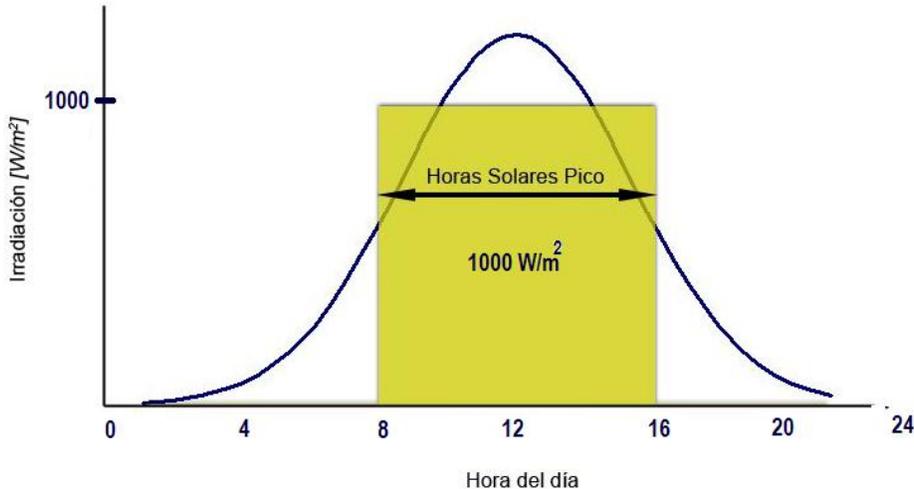


**Figura 2.5. Tipos de Paneles Fotovoltaicos.**

## **2.6. Radiación solar**

Es la energía radiante que incide en una superficie de área conocida en un intervalo de tiempo dado. Su unidad de medida es el Watt-hora por metro cuadrado ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ ). La radiación también se expresa en términos de horas solares pico. Una hora de energía es equivalente a la energía recibida durante una hora, a una radiación promedio de  $1,000 \text{ W}/\text{m}^2$  es decir, la potencia incidente de 1000 Watts por unidad de superficie. La energía útil que entrega el panel fotovoltaico es directamente proporcional a la radiación incidente. Para calcularla se puede asumir que no hay atmósfera o que se mide en la parte alta de ella y se denomina insolación diurna o anual no atenuada, otra forma es medir en la superficie de la Tierra teniendo en cuenta la presencia de la atmósfera, en este caso se denomina

radiación atenuada siendo más complejo calcularla. En la figura 2.6 se muestra la radiación correspondiente a un día, la cual es representada por el área amarilla en la misma.



**Figura 2.6. Curva de Radiación solar y horas solares pico.**

La radiación es un parámetro muy importante en el diseño de sistemas solares. Los factores climáticos y el ángulo de posicionamiento del panel con respecto al sol afectan la radiación sobre la superficie de captación. En zonas de poco sol, ya sea por nubes, neblina u otro factor, la radiación promedio en un periodo de tiempo es menor. En días de invierno los niveles de radiación promedio son considerablemente menores en comparación a los días de verano, esto se da para lugares cuya latitud sea mayor a los  $15^\circ$ .

## **2.7. Orientación de un Panel Fotovoltaico.**

La orientación e inclinación son aspectos determinantes en los arreglos fotovoltaicos para su producción eléctrica. La radiación solar que incide sobre una placa variará con el ángulo que forme la misma con la radiación. La captación de energía solar será máxima cuando la posición de la placa solar sea perpendicular a la radiación. La inclinación de los rayos del sol respecto a la superficie horizontal es variable a lo largo del año (máxima en verano y mínima en invierno) y por tanto, en aquellas instalaciones cuyos paneles estén fijos, existirá un ángulo de

inclinación que optimizará la colección de energía sobre una base anual como se muestra en la figura 2.7. Es decir, conviene buscar el ángulo de inclinación de los paneles respecto al plano horizontal que hace máxima la potencia media anual recibida. Si se establece una orientación hacia el sur geográfico y un ángulo de inclinación igual al ángulo de latitud, se maximiza la producción en términos anuales. Puede ocurrir que la instalación no vaya a usarse todo el año sino sólo en ciertas épocas. Si la instalación se va a usar preferentemente en verano conviene que la inclinación del colector sea menor que la latitud del lugar, aproximadamente en  $15^\circ$ . Evidentemente, las pérdidas de las superficies horizontales con respecto a las que están inclinadas aumentan progresivamente a medida que nos acercamos al norte (en el hemisferio norte) o al sur (en el hemisferio sur). En los polos, los planos horizontales son inútiles. No obstante, es extremadamente difícil valorar las pérdidas en los climas templados ya que la proporción de luz difusa del sol es más grande debido a la presencia de polvo, vapor de agua y nubes. La orientación no ofrece ninguna ventaja en cuanto a la energía recibida desde la radiación indirecta. Por el contrario, debido a que los paneles inclinados reciben la luz de una parte del hemisferio, estos recogen menos luz difusa que los receptores horizontales.

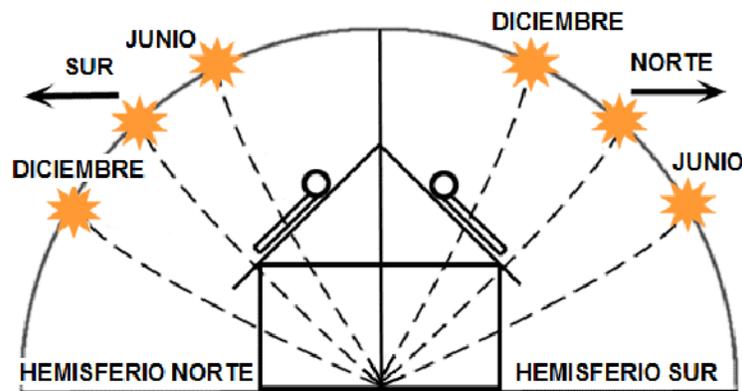
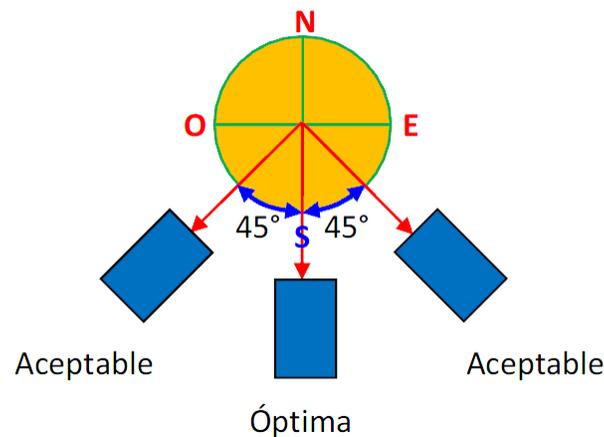


Figura 2.7. Inclinación del sol a lo largo del año.

La localización aparente del sol al Este u Oeste del Sur Verdadero se llama azimut, el cual se mide en grados al Este u Oeste del Sur, como hay 360 grados

en una circunferencia y 24 horas en un día, el sol parece moverse 15 grados en azimut cada hora (360 grados divididos entre 24 horas). El Sur magnético o el Sur marcado por una brújula se orientan con el campo magnético de la Tierra, el cual no está necesariamente alineado con el eje de rotación de la Tierra. La desviación del Sur magnético respecto al Sur geográfico o Sur verdadero recibe el nombre de declinación magnética. En la figura 2.6.1 se muestra la orientación de un arreglo FV para la máxima producción anual.



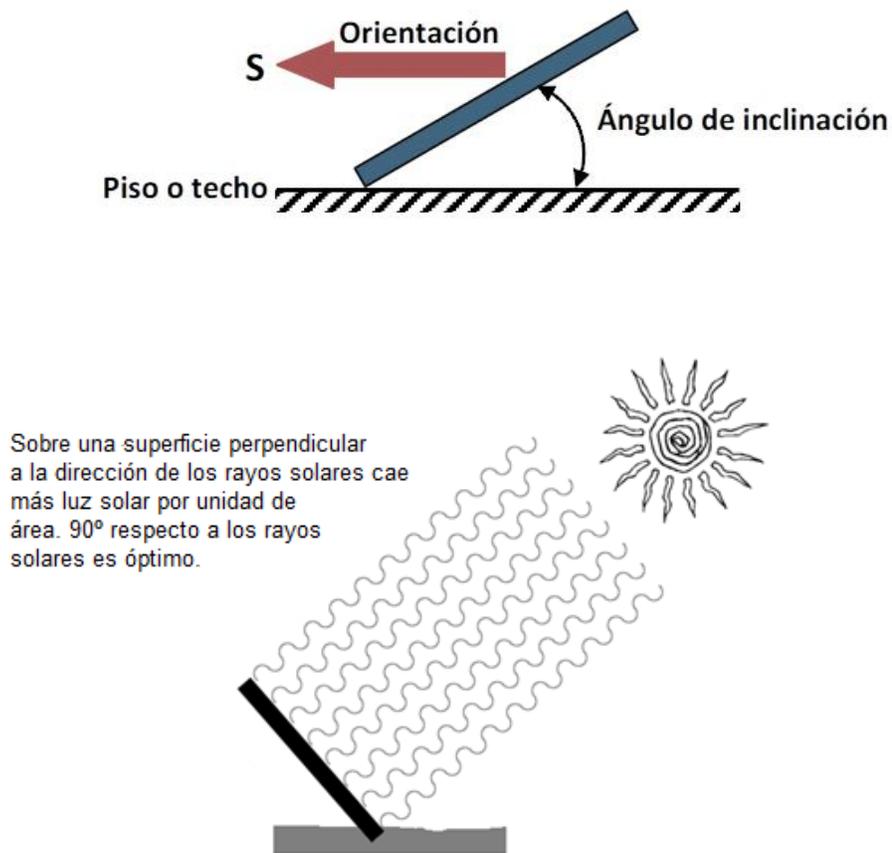
**Figura 2.6.1. Orientación de un arreglo Fotovoltaico para la máxima producción anual**

El rendimiento diario puede optimizarse si los colectores montados se fijan frente al Sur geográfico (verdadero) o con azimut 0 grados, que es la mejor orientación genérica.

## **2.8. Ángulo de inclinación de un Panel Fotovoltaico.**

La altura del sol por encima del horizonte se llama altitud, la cual se mide en grados por encima del horizonte. Cuando el sol parece estar saliendo o poniéndose, su altitud es de cero grados. Cuando el sol está al Sur verdadero en el cielo con azimut de cero grados, estará en su altitud máxima para ese día. Ese momento se llama mediodía solar. La latitud de una localidad determina cuan alto aparecerá el sol por encima del horizonte en el mediodía solar a lo largo del año. Como resultado del movimiento orbital alrededor del sol con un eje inclinado, el sol

aparece a diferentes altitudes por encima del horizonte a mediodía a lo largo del año. Para optimizar el rendimiento de un sistema se deben considerar los cambios estacionales en la altitud del sol. En la figura 2.8 se puede apreciar que la elevación del panel FV es igual a la latitud así como la forma óptima de recepción de rayos solares.



**Figura 2.8. Diagrama de inclinación de Un panel Fotovoltaico forma óptima de recepción de rayos solares**

En la tabla 2.6 se bosqueja el ángulo de inclinación óptimo de un arreglo fotovoltaico para diferentes cargas estacionales.

Tabla 2.6. Inclinación de acuerdo a la estación del año.

Ángulo de inclinación	Resultado
Latitud del lugar de la instalación	Máxima generación eléctrica anualizada y durante la primavera y el otoño.
Latitud del lugar de la instalación menos 15°	Máxima generación eléctrica en el verano.
Latitud del lugar de la instalación más 15°	Máxima generación eléctrica en el invierno.

Los arreglos fotovoltaicos trabajan mejor cuando los rayos del sol inciden perpendicularmente (90 grados) a las celdas. Como los sistemas acoplados a la red tienen al sistema eléctrico público como fuente de respaldo, hay más flexibilidad en la ubicación del arreglo que para los sistemas autónomos. Para un arreglo acoplado a la red, si no se puede lograr el ángulo óptimo, el sistema producirá un por ciento de la energía total disponible ya que el servicio público proveerá la diferencia. Como los sistemas acoplados a red compensan el uso promedio anual de la energía, (en lugar de alimentar directamente a las cargas), los diseñadores pueden elegir un montaje empotrado del arreglo en la cubierta más por razones estéticas que para lograr los ángulos de inclinación y orientación óptimos.

## 2.9. Temperatura de un panel Fotovoltaico

El aumento de temperatura en las celdas supone un incremento en la corriente, pero al mismo tiempo una disminución mucho mayor, en proporción, de la tensión. El efecto global es que la potencia del panel solar disminuye al aumentar la temperatura de trabajo del mismo. Tanto la corriente de cortocircuito como el voltaje a cortocircuito abierto, se ven afectados por la temperatura de trabajo, así mismo como su magnitud porcentual, son distintos para estos dos parámetros. Cuando la temperatura de trabajo es menor que 25°C, el voltaje de circuito abierto

crece, y la corriente de cortocircuito disminuye. Para la mayoría de los paneles FV cuando la temperatura de trabajo aumenta, el valor de la potencia de salida disminuye. En la práctica, debido a la disipación de calor dentro de las celdas del panel, salvo en climas muy fríos, la temperatura de trabajo excede los 25°C. Cuando ello ocurre, la potencia de salida nunca alcanza el valor pico especificado por el fabricante. El diseño de un sistema FV debe tener en cuenta esta degradación del panel, a fin de asegurar que los requerimientos eléctricos del sistema pueden ser satisfechos durante los días más calurosos del verano. Para el periodo invernal, si el mínimo para la temperatura promedio es menor a los 25°C, no se considera ninguna degradación para la potencia de salida pico.

El funcionamiento del módulo FV se ve afectado por la intensidad de la radiación y de la temperatura. La figura 2.9 muestra el comportamiento de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de la radiación solar. Se presenta un aumento proporcional de la corriente producida con el aumento de la intensidad. También se debe observar que el voltaje a circuito abierto ( $V_{ca}$ ), no cambió, lo cual demuestra su estabilidad frente a los cambios de iluminación.

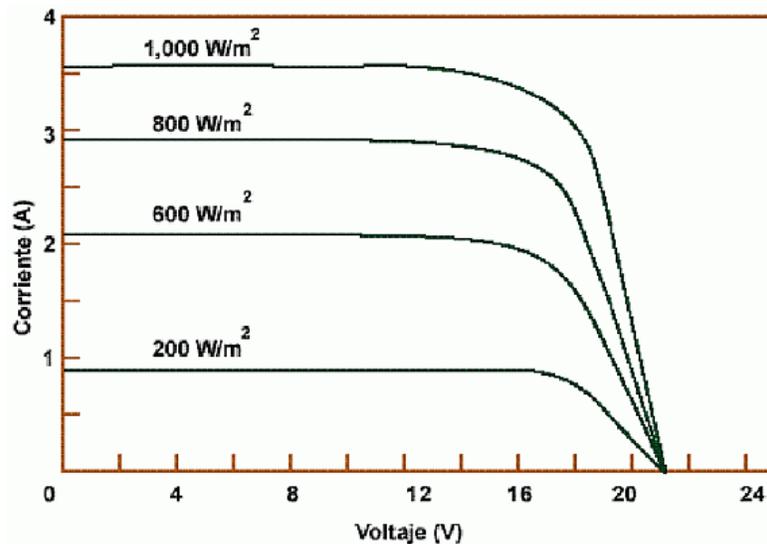


Figura 2.9. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de radiación (temperatura constante de 25 °C).

En la figura 2.9.1 se muestra el efecto que produce la temperatura sobre la producción de corriente en el módulo. El efecto se manifiesta en el voltaje del módulo. La potencia nominal se reduce aproximadamente 0.5% por cada grado centígrado por encima de 25 ° C.

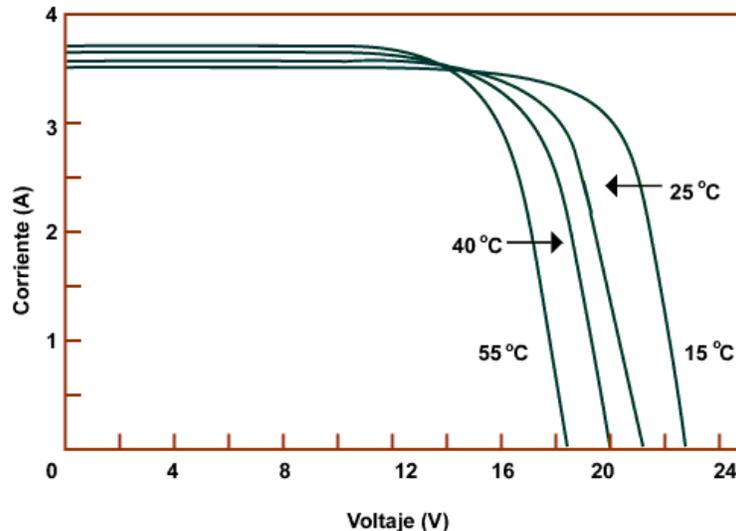
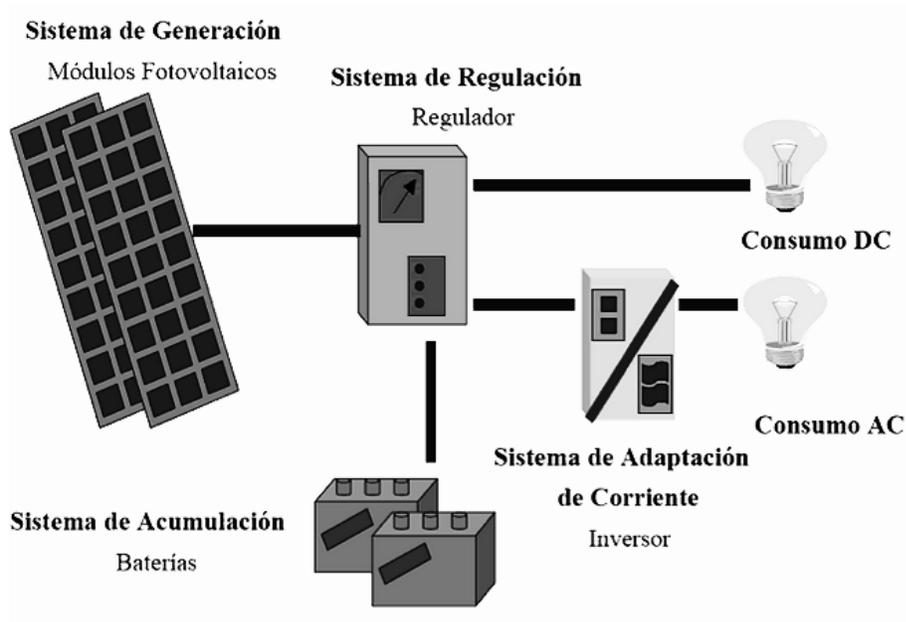


Figura 2.9.1 Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes temperaturas de operación (radiación constante 1,000W/m<sup>2</sup>).

## 2.10. Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

### 2.10.1. Sistema FV autónomo

Los sistemas autónomos son los que están conectados a baterías que permiten el suministro eléctrico en periodos de poco o nulo aprovechamiento de la radiación solar. Estos a su vez, pueden diferenciarse por el consumo al que están conectados: así pueden haber sistemas autónomos con elementos de consumo en corriente alterna o elementos de consumo de corriente continua , como se muestra en la figura 2.10.1.



**Figura 2.10.1 Sistema Autónomo.**

### **2.10.2. Sistemas FV interconectado**

Son sistemas que necesitan de conexión con la red eléctrica convencional. Son los sistemas en los que la energía generada por el campo fotovoltaico se entrega directamente a la red general de distribución como se muestra en la figura 2.10.2. Las instalaciones conectadas a la red no poseen baterías ni reguladores, componiéndose únicamente de los módulos fotovoltaicos y del inversor. Los módulos fotovoltaicos son los mismos que para las instalaciones aisladas de la red, sin embargo, los inversores deben disponer de un sistema de medida de la energía consumida y entregada, ser capaz de interrumpir o reanudar el suministro en función del estado de campo de paneles y adaptar la corriente alterna producida en el inversor a la fase de la energía de la red.

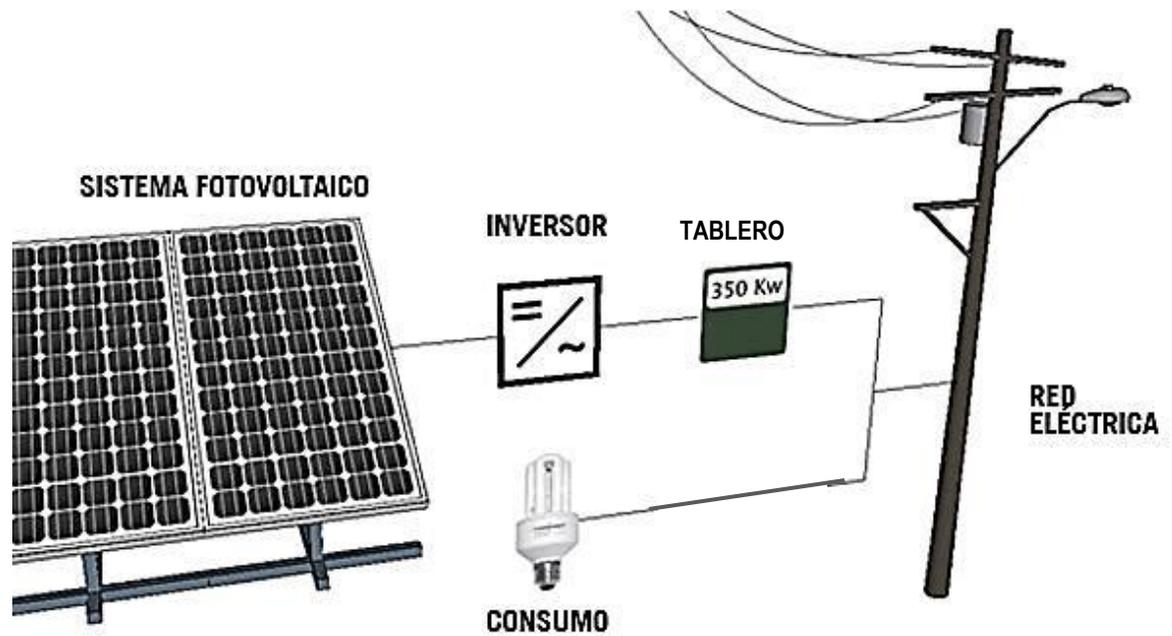


Figura 2.10.2 Sistema conectado a la red eléctrica pública.

## 2.11. Inversor

El inversor es un convertidor electrostático que por medio del uso de componentes electrónicos de potencia convierten la corriente directa en corriente alterna. Estos inversores generan variedad de ondas en su salida, dependiendo de lo sofisticado que sea el equipo. El propósito fundamental del inversor de un sistema FV es cambiar la corriente directa de los módulos fotovoltaicos (cuando está conectada con la red eléctrica pública) y las baterías (en los sistemas autónomos o acoplados a la red eléctrica pública con respaldo de baterías) a corriente alterna, y finalmente para alimentar las cargas de corriente alterna. Los inversores también pueden alimentar a la red con electricidad. Los inversores diseñados para acoplarse con la red eléctrica son llamados inversores conectados a la línea o inversores conectados al servicio eléctrico como se muestra en la figura 2.11.



Figura 2.11. Inversor marca Fronius.

### 2.11.1. Tipos de Inversores

Existen tres categorías de inversores:

**-Inversor conectado a la red:** Los inversores conectados a la red de servicio público, usa la energía del servicio como una batería de almacenaje. Cuando el sol está brillando, la electricidad es abastecida del arreglo fotovoltaico a través del inversor. Si el arreglo FV está produciendo más energía de la que se está utilizando, el exceso se conduce hacia la red eléctrica pública. Si se utiliza más energía de la que puede dar el sistema FV, la red eléctrica le proporcionara la diferencia. También, en la noche o durante un día nublado, toda la energía es suministrada por la red eléctrica pública.

**-Inversor autónomo:** Un inversor autónomo necesita ser versátil para cuantificar de manera continua el ritmo de demanda, la entrada del generador, las cargas de baterías y las cargas de sobrecorriente.

**-Inversor conectado a la red con respaldo de baterías:** El tipo de inversores con respaldo de baterías son más complejos que los inversores interconectados sin baterías, porque necesitan vender la energía a la red eléctrica pública, suministrar energía a las cargas de respaldo durante un la interrupción imprevista de la energía eléctrica (incluyendo subidas bruscas de la tensión eléctrica) y

cargar las baterías desde la red eléctrica pública después de un corte eléctrico. Estos inversores deben tener características similares tanto para un inversor interconectado sin baterías cuando brinda energía a la red eléctrica como a un inversor independiente cuando está alimentando las cargas de respaldo durante la interrupción imprevista de la energía eléctrica pública.

## 2.12. Tipos de montaje de paneles Fotovoltaicos

Para montar los módulos se deben considerar muchos factores para seleccionar el sitio apropiado. La ubicación de los paneles debe ser orientada al sol y estar libre de obstáculos que no arrojen sombra a través de las trayectorias diarias y estacionales del sol. El sitio debe estar en la cercanía del centro de acondicionamiento para minimizar las pérdidas en las líneas. Una vez que se haya determinado el lugar donde será puesto, se puede determinar el tipo de sistema de montaje que mejor se adecue al sitio y también de acuerdo a la demanda del sistema.

**-Montaje en tierra:** La estructura de apoyo del arreglo montado en tierra usa un marco atornillado directamente a bases preparadas. A este marco se le atornillan soportes transversales para incrementar el apoyo estructural lateral y prevenir daños por el viento. Los cimientos deben resistir los efectos del elevador y cortante (movimiento lateral) del viento, como se muestra en la figura 2.12.

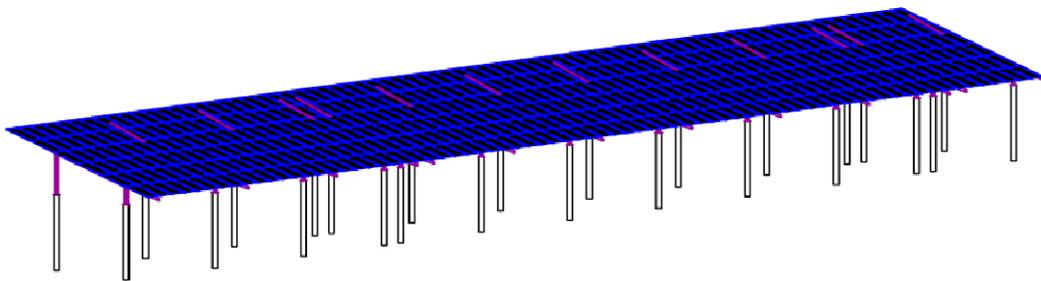
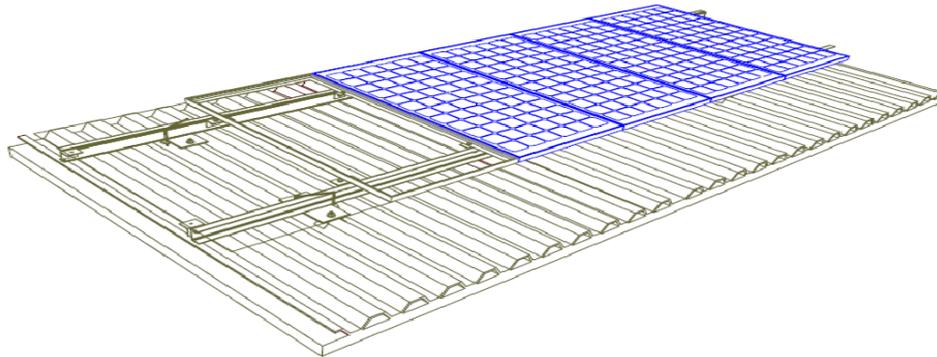


Figura 2.12 Montaje en tierra

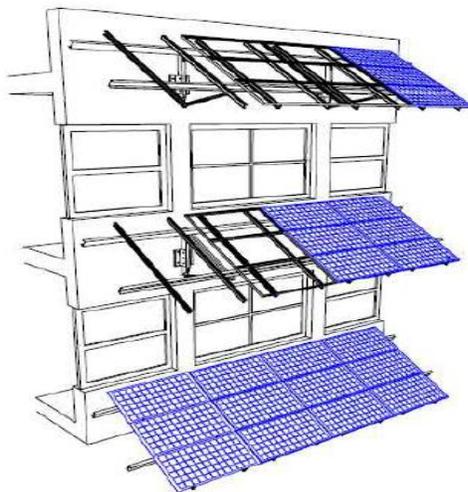
**-Montaje directo:** En este sistema los módulos fotovoltaicos están montados directamente sobre los materiales convencionales que cubren el tejado y eliminan

la necesidad de una estructura de soporte y rieles de montaje. Los módulos no deben perturbar la integridad de la impermeabilización de la cubierta del techo y debe quedar bien sellado utilizando el sellador adecuado, como se muestra en la figura 2.12.1



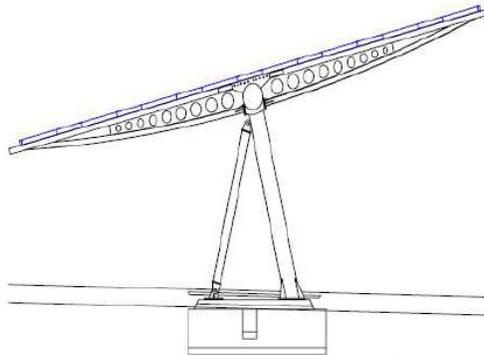
**Figura 2.12.1. Montaje directo.**

**-Montaje por separado:** Los sistemas de montaje por separado sitúan a los módulos paralelos al techo con una separación entre las dos superficies para permitir un flujo de aire adecuado entre los módulos. Los módulos se sitúan en carriles acanalados a los que son fijados con grapas que agarran el marco de aluminio. Estos rieles se fijan al techo con patas de montaje, como se muestra en la figura 2.12.2.



**Figura 2.12.2. Montaje por separado.**

**-Montaje con seguimiento:** El montaje de los arreglos fotovoltaicos que siguen al sol durante su trayectoria diurna por el cielo constituye una alternativa económica para algunas instalaciones. Las unidades de seguimiento pasivas no tienen motores, controles o engranajes y usan el cambio de peso de un refrigerante dentro de tubos sellados para seguir al sol. La luz solar activa al refrigerante y el marco en su conjunto se mueve por gravedad o accionado por un pistón. Pueden ser ajustados estacionalmente para optimizar el ángulo de altitud. Los seguidores activos usan motores alimentados por pequeños sistemas fotovoltaicos integrados al sistema para mover el arreglo. Los seguidores solares que siguen el azimut solar pero no su altitud reciben el nombre de seguidores de un solo eje o de simple eje. En general, las unidades de seguimiento incrementan el rendimiento anual de un sistema entre 25% y 30%, pero pueden incrementar significativamente el costo del sistema, como se muestra en la figura 2.12.3.



**Figura 2.12.3.Montaje con seguimiento.**

### **2.13. Mantenimiento**

El mantenimiento del sistema fotovoltaico es muy bajo comparado con otros sistemas energéticos. Si el sistema está en un entorno cuyo clima es polvoriento y con poca lluvia, el arreglo debe ser limpiado periódicamente. El mantenimiento de los paneles fotovoltaicos es mínimo, no tiene partes móviles sometidas a desgaste, no requiere cambio de piezas (salvo que rompan por alguna circunstancia no prevista) o lubricación. Se tiene que tener en cuenta para

asegurar que ningún obstáculo haga sombra sobre los paneles y mantenerlos limpios donde la lluvia se encarga de realizar la limpieza de los mismos.

Los principales puntos a revisar:

- Inspección visual de residuos
- Limpieza de paneles
- Inspección del cableado de los paneles
- Control de características del panel fotovoltaico
- Inspección de la estructura metálica
- Efecto sombra

Estos pasos de mantenimiento se deben realizar al menos una vez al año.

-Mantenimiento Preventivo: como principal objetivo tiene el prevenir el funcionamiento ineficiente de un sistema

-Mantenimiento Correctivo: en este mantenimiento es fundamental el tiempo de respuesta, teniendo en cuenta que el tiempo perdido en la reparación repercute en la producción del sistema fotovoltaico. La pronta detección de la falla, es un punto fundamental en el mantenimiento correctivo. Después de detectar la falla el siguiente paso es solucionarlo y si se requiere hacer un análisis.

-Mantenimiento Predictivo: los pasos a realizar es controlar las operaciones de arranque y paro de los sistemas, inversores, la vigilancia y supervisión de la adecuada operación de producción, el análisis de las señales, alarmas y parámetros del sistema fotovoltaico.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Diseño del sistema fotovoltaico**

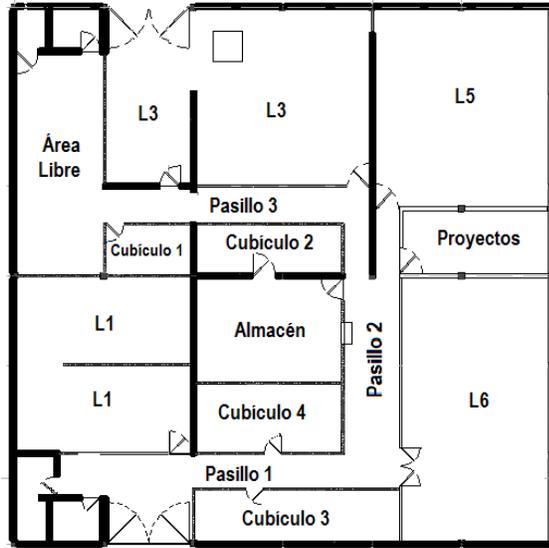
El sistema Fv se diseñó en función de la potencia requerida por las luminarias en el Laboratorio de Automatización de la Universidad Autónoma de Querétaro, con lo cual se pretende el aprovechamiento óptimo de la energía producida por el sistema FV. Como aspecto principal hay que tener en cuenta la disposición de los paneles fotovoltaicos con respecto al sol, por lo que se pretendió instalarlo en un lugar donde se aprovechara la mayor cantidad de radiación solar. Para el lugar de instalación se tuvo en cuenta los siguientes factores básicos: el espacio, la orientación, la inclinación y las posibles sombras.

Para la instalación del sistema Fotovoltaico se eligió la Dirección (edificio A) de la Facultad de Ingeniería, aprovechando así el espacio del techo de este edificio, por encontrarse libre de sombras y por su fácil acceso al sistema, como para su mantenimiento.

##### **3.1.1. Características específicas de la carga del Laboratorio de Automatización**

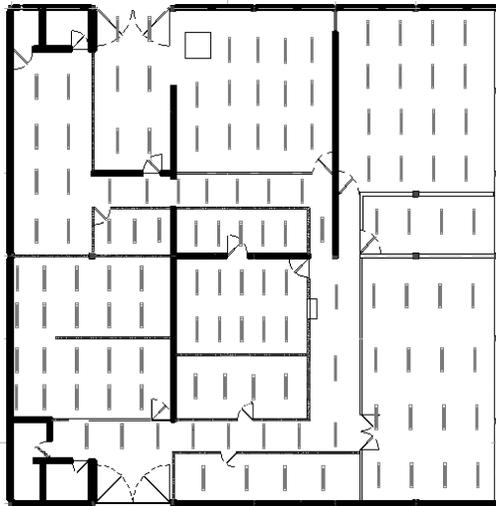
El Laboratorio de Automatización se localiza en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. El Laboratorio de Automatización cuenta con una superficie de 576 m<sup>2</sup> en el cual se subdivide en cuatro laboratorios (L1, L2, L3 y L4), cinco cubículos (1, 2, 3, 4 y proyectos), tres pasillos, un almacén, y un área libre que funciona como laboratorio como se muestra en la figura 3.1.1.

Las características de su sistema del alumbrado y consumo energético se explican más a detalle en los siguientes apartados.



**Figura 3.1.1. Distribución de las áreas del Laboratorio de Automatización [2].**

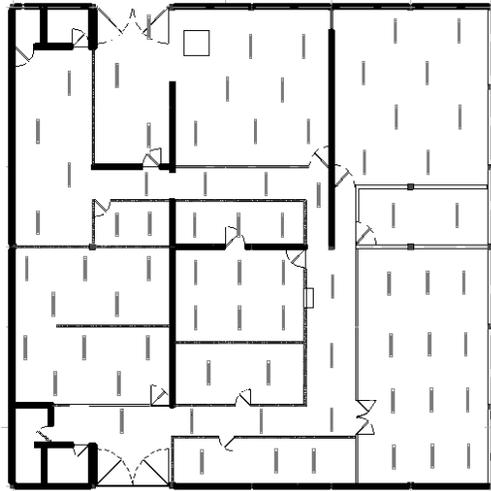
El Laboratorio presta servicio de las 7:00 a las 22:00 hrs por lo que existen áreas que se mantienen iluminadas durante el horario antes descrito y otras por periodos de menos tiempo. Cuenta con un total de 128 lámparas instaladas (Figura 3.1.1.1). Cada lámpara tiene un consumo de 56 W.



**Figura 3.1.1.1 Distribución inicial de lámparas en el Laboratorio de Automatización.**

Posteriormente se realizó un estudio de iluminación según la norma (NOM025-STPS-2008), y como resultado se obtuvo un exceso de iluminación en algunas áreas del Laboratorio, por lo que se propuso un nuevo sistema de luminarias,

reduciendo a un total de 75 lámparas (Figura 3.1.1.2), 53 lámparas menos que el sistema original [2].



**Figura 3.1.1.2 Nueva Distribución de Laboratorio de Automatización.**

Uno de los datos más críticos es la potencia que las cargas a conectarse requieren del sistema. Junto a este dato, es necesario especificar el tiempo diario de uso de la carga respectiva. Al multiplicar el número de horas por la potencia utilizada, se obtiene la energía necesaria para alimentar las luminarias, expresada en kilo Watt-hora diarios (kW/h). Tomando como referencia el nuevo sistema de iluminación que se propuso e implementó, en la tabla 3.1.1 se muestra el consumo de cada área y el consumo total en kW/h del Laboratorio.

**Tabla 3.1.1. Consumo total del sistema de iluminación del Laboratorio.**

Área	Número de lámparas	Consumo (kW)	Horas encendido	Consumo (kW/h)
L6	12	672	13	8.736
L5	8	448	13	5.824
L3	7	392	6	2.352
L4	3	168	13	2.184
L1	10	560	13	7.28
Cubículo 4	2	112	8	0.896
Cubículo 3	3	168	8	1.344
Cubículo 1	2	112	8	0.896

<b>Proyectos</b>	2	112	6	0.672
<b>Almacén</b>	10	560	15	8.4
<b>Pasillo</b>	10	560	24	13.44
<b>Área Libre</b>	4	224	15	3.36
<b>Cubículo 2</b>	2	112	9	1.008
<b>Total</b>	<b>75</b>	<b>4200</b>		<b>56.392</b>

### 3.1.2. Cálculo del arreglo de paneles Fotovoltaicos

Mediante el estudio previo realizado y tomando en cuenta el nuevo sistema de luminarias propuesto, se diseña un sistema Fotovoltaico interconectado a la red eléctrica pública, con el cual se alimentará un 28.2% de la energía consumida por el sistema de alumbrado del Laboratorio [2].

El sistema se compone de un arreglo de 15 paneles FV conectados en serie. Los paneles que se utilizaron para la instalación son paneles fotovoltaicos policristalinos marca ERDM 200SP/6 con potencia máxima cada uno de 200 W, voltaje nominal de 25.98 y corriente nominal de 8.26 A, en el Apéndice A se muestran la hoja de datos del panel FV.

En la tabla 3.1.2 se muestra en resumen los datos técnicos del sistema fotovoltaico instalado.

Tabla 3.1.2. Descripción del sistema fotovoltaico.

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Número de paneles:</b>	15
<b>Potencia de cada panel (W):</b>	200
<b>Voltaje nominal de cada panel (VDC):</b>	24
<b>Corriente nominal de cada panel (A):</b>	8.26
<b>Potencia Instalada (W):</b>	3000
<b>Horas solares pico en Querétaro (h):</b>	5.9
<b>Consumo de energía del Laboratorio kW/h</b>	56.392

La Figura 3.1.2 muestra el diagrama unifilar del sistema FV. El beneficio de ser un sistema FV interconectado a la red es que no se necesita un controlador de carga ni baterías para almacenar la energía, así como también si no se produce la suficiente energía por el sistema FV, se tiene el respaldo del sistema eléctrico convencional.

La desventaja de un sistema Fotovoltaico interconectado a la red es que en caso de que el suministro de energía eléctrica por parte de la compañía generadora falle, el sistema FV no podrá alimentar las cargas del laboratorio.

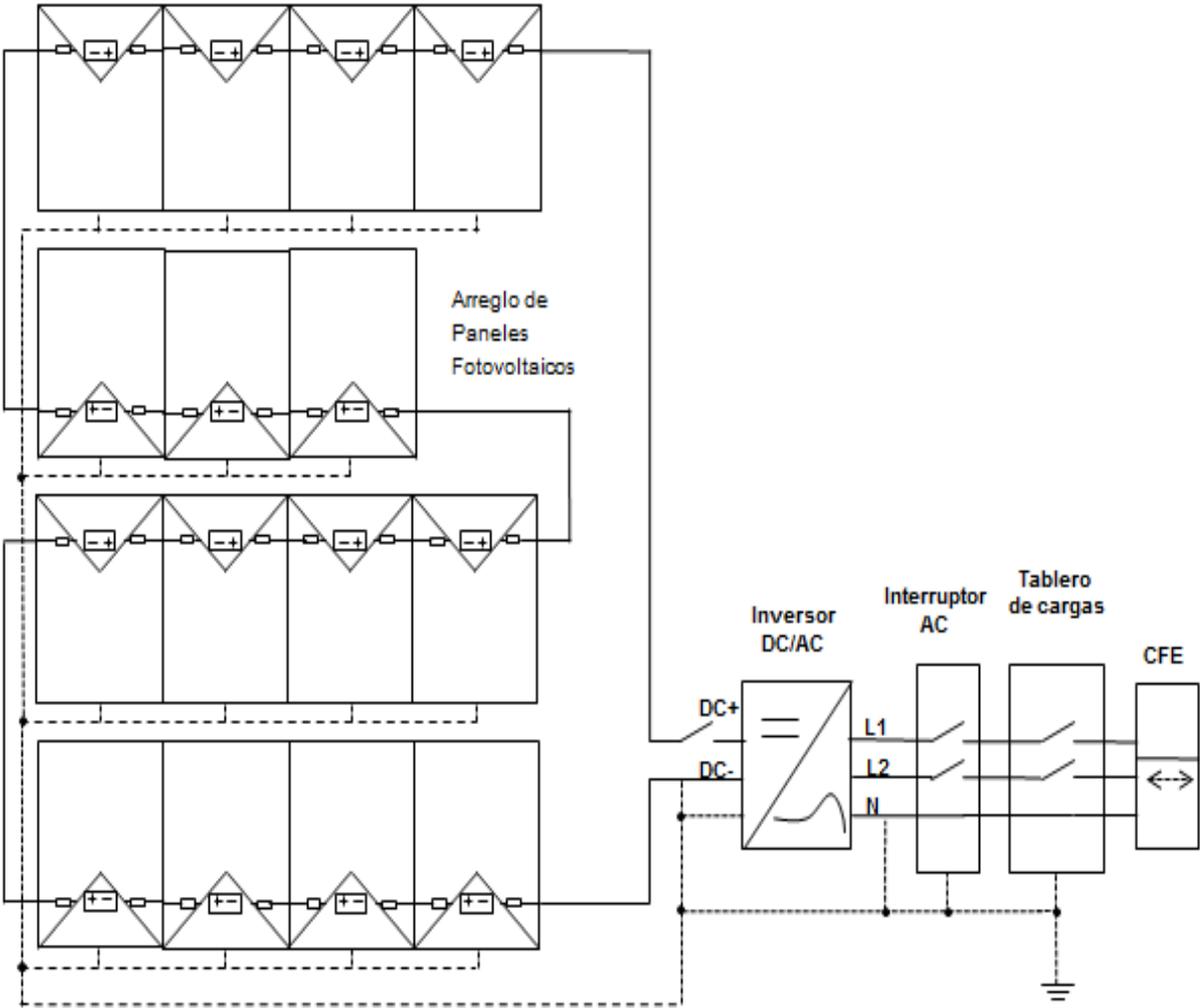


Figura 3.1.2. Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico.

### 3.1.3. Cálculo del ángulo de inclinación de los paneles

Para determinar el ángulo de inclinación al cual deben estar los paneles fotovoltaicos, se utiliza el valor de la latitud del lugar geográfico de la ciudad de Querétaro donde se instalará el sistema, ya que es el ángulo de inclinación para la máxima generación eléctrica anualizada y durante la primavera y el otoño.

La Ciudad de Querétaro donde se encuentra el Laboratorio de Automatización tiene como coordenadas geográficas latitud  $20.61^{\circ}$  y Longitud  $-100.407^{\circ}$  [13]. En la tabla 3.1.3 se muestran las características generales y ubicación geográfica de la ciudad de Querétaro.

**Tabla 3.1.3. Características generales y ubicación geográfica Querétaro [13].**

	Unidad	Clima Local
<b>Latitud</b>	°N	20.61
<b>Longitud</b>	°E	-100.407
<b>Elevación</b>	m	2094
<b>Temperatura promedio de la Tierra</b>	°C	16.29

Para el caso del sistema FV del Laboratorio de Automatización interconectado a la red, los módulos fotovoltaicos están propuestos a una inclinación fija a lo largo de todo el año, como es este caso, el criterio a seguir para obtener una optimización del sistema consiste en dar un grado de inclinación tal que permita recibir la mayor cantidad de energía en el todo el año.

De acuerdo a la tabla 3.1.3.1 de radiación solar incidente sobre superficies inclinadas orientadas al sur para la Ciudad de Querétaro, se promediaron, y la inclinación que permite recibir mayor cantidad de energía es la de  $21^{\circ}$  (Figura 3.1.3) sobre la horizontal, ya que es la óptima para la época de mayor radiación solar del año, además es igual a la latitud.

Tabla 3.1.3.1. Radiación solar incidente en Querétaro y ángulo de inclinación promedio [13].

Latitud 20.61	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Longitud - 100.4													Promedio
Horas solar pico	4.8	5.9	6.8	7.0	6.8	6.4	6.1	6.1	5.5	5.3	5.1	4.6	5.9
Difusa	1.1	1.1	1.3	1.7	2.1	2.2	2.3	2.1	2.0	1.6	1.1	1.0	1.6
Directa	7.0	7.9	8.4	7.7	6.8	5.9	5.5	5.6	5.3	6.1	7.2	6.8	6.7
Inclinación 0	4.8	5.8	6.7	6.9	6.8	6.3	6.1	5.9	5.4	5.2	5.1	4.4	5.8
Inclinación 5	5.2	6.1	6.9	7.0	6.7	6.4	6.2	5.9	5.5	5.4	5.4	4.8	6.0
Inclinación 20	6.0	6.8	7.2	6.8	6.3	6.3	6.1	5.7	5.6	5.8	6.2	5.6	6.2
Inclinación 35	6.5	7.1	7.1	6.4	5.5	6.0	5.7	5.3	5.3	5.9	6.6	6.0	6.1
Inclinación 90	5.2	4.8	3.7	2.3	1.8	2.6	2.4	1.9	2.6	3.7	5.1	4.8	3.4
Óptimo	6.6	7.1	7.2	7.0	6.8	6.4	6.2	5.9	5.6	5.9	6.7	6.2	6.5
óptimo ANG	48.0	38.0	24.0	8.0	0.0	10.0	8.0	2.0	16.0	32.0	45.0	48.0	21.1°

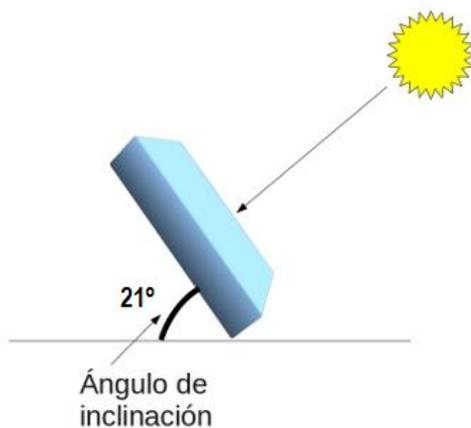


Figura 3.1.3. Inclinación de los Paneles FV para el Laboratorio de Automatización.

### 3.1.4. Orientación

La ciudad de Querétaro se localiza en el hemisferio Norte por lo tanto el sistema Fotovoltaico se orienta hacia el Sur geográfico, cabe recordar que el sur geográfico no es el mismo que el sur magnético, el cual es marcado por una brújula. (Figura 3.1.4). Para la orientación se requirió una brújula la cual se colocó sobre una superficie plana del techo de la Dirección de la Facultad de Ingeniería (Edificio A), para posteriormente fijar las estructuras con los paneles Fotovoltaicos según de acuerdo a la orientación señalada. Después se fijaron las estructuras al techo con la orientación que marco la brújula hacia el sur.



Figura 3.1.4. Brújula: sur geográfico.

### 3.1.5. Cálculo de las dimensiones del de la estructura de los paneles FV

Uno de los elementos más importantes en toda instalación Fotovoltaica para asegurar un completo aprovechamiento de la radiación solar es la estructura de soporte. Las dimensiones de la estructura de los paneles en cuanto altura e inclinación se calcularon tomando en cuenta los grados de la latitud ( $21^\circ$ ), los cuales indican el ángulo de inclinación que debe tener la estructura , así como también las dimensiones que tienen los paneles fotovoltaicos como se muestra en la tabla 3.1.5 (Apéndice A). El cálculo se hizo con teorema de Pitágoras tomando las dimensiones del panel FV.

Tabla 3.1.5. Dimensiones del panel fotovoltaico ERDM 200S7P/6

Características del panel	Especificación
Largo	1481mm
Ancho	991mm
Alto	50 mm

Cálculo de A (Altura)

$$\text{Altura } A = (1.481m)(\text{sen } 21) = 0.531 \text{ m}$$

Cálculo de B (Largo)

$$\text{Largo } B = (1.481m)(\text{cos } 21) = 1.383m$$

En la Figura 3.1.5 se muestra el diseño del bastidor de aluminio de la estructura para el sistema.

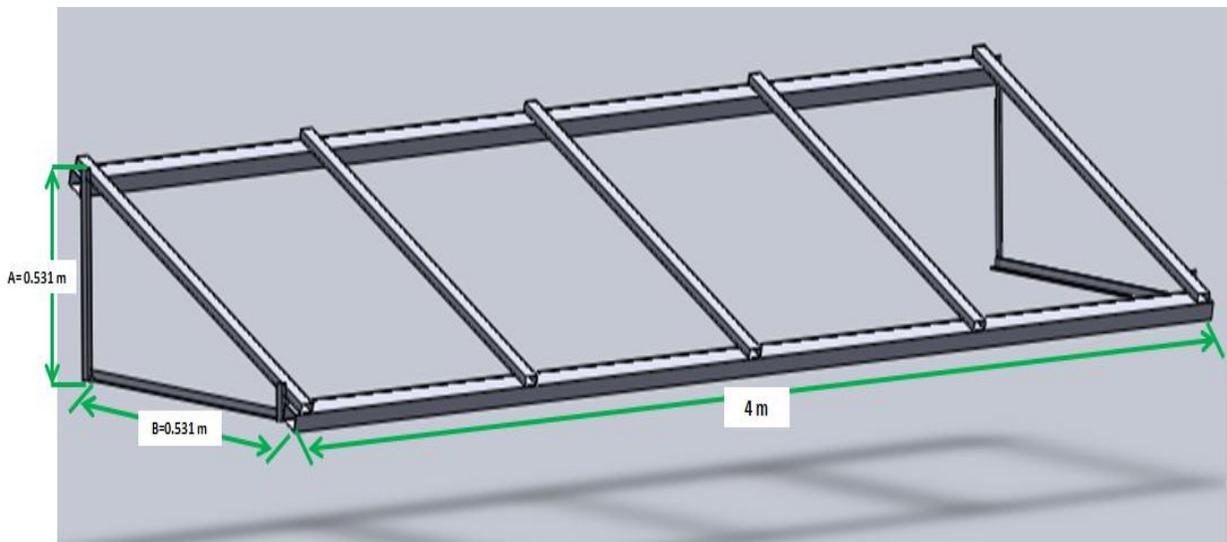


Figura 3.1.5. Estructura de aluminio

La estructura para el montaje de los paneles, se hizo con perfil de aluminio de 3" x 1.5" y perfil de 3/4" x 1". Cada estructura se hizo para cuatro paneles, y como el sistema se conforma por 15 paneles, por lo tanto se hicieron cuatro estructuras.

### 3.1.6. Especificación del inversor

El inversor utilizado de acuerdo a los requerimientos del diseño del sistema FV, es un inversor para instalación fotovoltaica acoplado a la red, marca Fronius IG 3000-LV. El cual tiene para una máxima potencia instalada de 3000 Wp (Watts pico) y una tensión máxima de 500 VDC (Voltaje de corriente directa) (Figura 3.1.6).



Figura 3.1.6. Inversor Fronius IG 3000-LV

Los datos técnicos generales del inversor Fronius IG 300 se muestran en el Apéndice B. El inversor se instaló cerca del sistema de paneles fotovoltaicos para disminuir las caídas de tensión en DC por el cableado, por lo que el inversor se colocó en una caja que también es ecológica hecha de PET reciclado que lo protege del sol y de la lluvia y que cuenta con un vidrio en la ventana para poder visualizar los datos que marca el inversor, como se muestra en la figura 3.1.6.1



Figura 3.1.6.1. Instalación de inversor

En el inversor se puede ver los siguientes datos del menú a través de la pantalla LCD, como se muestra en la tabla 3.1.6

**Tabla 3.1.6. Menú de parámetros en inversor**

	<p><b>Potencia suministrada</b> Potencia actualmente suministrada a la red (vatios)</p>
	<p><b>Tensión de red</b> (voltios)</p>
	<p><b>Corriente suministrada</b> Corriente actualmente suministrada a la red (amperios)</p>
	<p><b>Frecuencia de red</b> (hercios)</p>
	<p><b>Tensión del módulo solar</b> Tensión actualmente aplicada a los módulos solares (voltios)</p>
	<p><b>Corriente del módulo solar</b> Corriente actualmente suministrada por los módulos solares (amperios)</p>
	<p><b>Temperatura del módulo solar (opción de Sensor Card/Box)</b> Temperatura en caso de los módulos solares, sensor de temperatura número 1 (°F)</p>
	<p><b>Estado GFDI</b> Si no existe ningún contacto a tierra en el sistema fotovoltaico, se muestra "GFDI OK"</p>

Estas pantallas son los principales pero se pueden ver más detalles en el menú específico del inversor. [14]

### 3.1.7. Dimensionamiento de los conductores

El cálculo para el tamaño del cableado se basa de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, la cual exige que la corriente de cortocircuito del módulo, se multiplique por el 125% y el resultado otra vez por 125%, que conlleva a un factor de multiplicación de corriente de cortocircuito de 156%, esto con la finalidad de que el conductor nunca lleve más del 80% de su capacidad nominal.

En la tabla 3.1.7 se muestran los datos técnicos de los paneles fotovoltaicos, en los cuales se basan el cálculo utilizados el dimensionamiento del cableado para este sistema. (Más detalle véase apéndice A)

Tabla 3.1.7. Datos técnicos del panel Fotovoltaico ERDM SP/6 del sistema.

Características	ERDM 200SP/6
Voltaje de Circuito Abierto ( $V_{oc}$ )	32.99 V
Voltaje de Operación óptimo ( $V_{mp}$ )	25.98 V
Corriente de Cortocircuito ( $I_{sc}$ )	8.26 A
Corriente de Operación óptima ( $I_{mp}$ )	7.75 A
Potencia Máxima en STC ( $P_{max}$ )	200 W
Temperatura de operación ( $^{\circ}C$ )	-40 a 90
Tolerancia de Potencia	+/- 3%

La conexión de los paneles Fotovoltaicos es en serie, por lo que la corriente de DC es la misma, la cual es de 8.26 A. Conforme a la Norma multiplicamos por los factores (1.25)(1.25) para tener en cuenta la corriente potencial en exceso producida por el arreglo fotovoltaico en condiciones de alta insolación .

$$Corriente\ DC\ Total = (8.26\ A)(1.25)(1.25) = 12.90\ A \approx 13\ A$$

Y el voltaje total es el voltaje de operación por la cantidad total de paneles (15 paneles).

$$Voltaje\ max\ DC\ Total = (25.98\ V)(15\ paneles) = 389.7\ VDC$$

Con referencia a la tabla 310-15(b) (16) (NOM-001-SEDE-2012) (Apéndice C) para el cableado de DC tomando la corriente total del sistema, de las terminales del arreglo de los paneles a la entrada del inversor se instala un cable calibre #10 AWG tipo THHW que es resistente al calor y termoplástico retardante del fuego, con aislamiento de 90 °C.

Para el cableado de AC la máxima corriente de salida del inversor es de 10.4 A. Tomando este dato y conforme a la Norma multiplicamos por el factor 1.56 para tener en cuenta la corriente potencial en exceso. Se sobre dimensionó el cable ya que en el sistema la caída de tensión debe ser menor al 2% en longitudes muy grandes.

$$Corriente\ AC\ Total = (10.4\ A)(1.56) = 15.22\ A \approx 16\ A$$

Se utilizará el calibre #10 THHW, que resistente al calor y termoplástico retardante del fuego, con aislamiento de 90 °C.

Para la elección de los colores del cableado se hizo de acuerdo al código de colores de la Norma. (Artículo 250.119.NOM-001-2012) Tabla 3.7.1.1

**Tabla 3.7.1.1. Código de colores del cableado**

<b>Código de color</b>	<b>Especificación</b>
<b>Rojo</b>	Fases L1 y L2
<b>Blanco</b>	Neutro
<b>Verde/Descubierto</b>	Tierra

En la figura 3.1.7 se muestran los conductores conectados al inversor, tanto de corriente AC así como de DC de los paneles FV al inversor, así como de inversor a la carga.

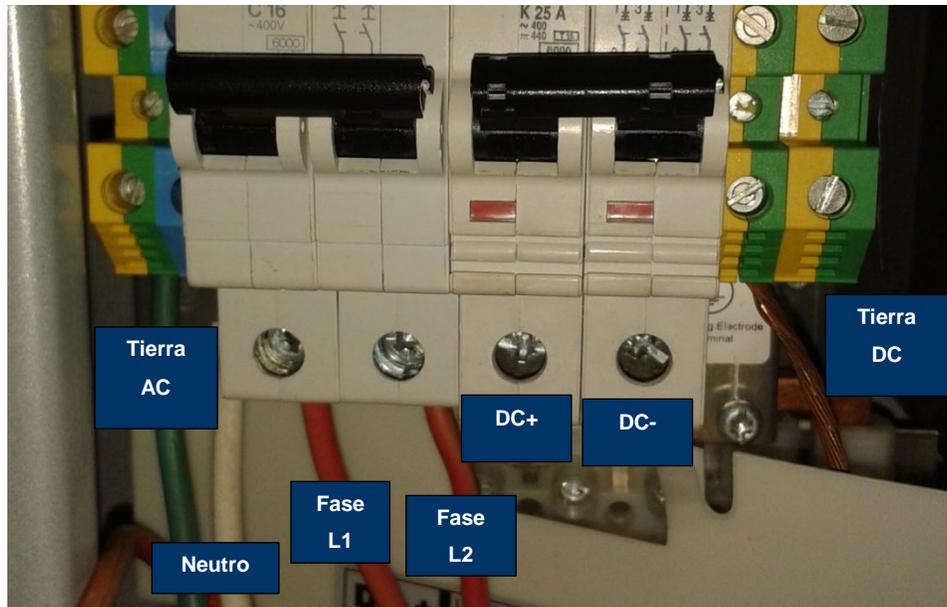


Figura 3.1.7. Cableado del inversor.

### 3.1.8. Cálculo de las protecciones-interruptor

El principal objetivo del interruptor termomagnético es proteger el alambrado de sobrecargas y la potencial provocación de un incendio. Para su dimensionamiento el interruptor debe ser menor o igual a la capacidad de corriente del cable usado, siempre que permita el paso de la corriente total de la fuente de energía o el consumo de las cargas, con los factores de seguridad incluidos. El inversor incluye los interruptores tanto para corriente AC y DC. Como se muestra en la Figura 3.1.8, lo cual ayuda a tener un mejor manejo de apago y encendido del sistema.



Figura 3.1.8. Interruptores de DC y AC

Para cálculo de la dimensionamiento del interruptor de AC que se colocó cerca del tablero de cargas, se toma como referencia la corriente nominal AC de salida del inversor que es de 10.4 A, conforme a la Norma (NOM-001-2012) multiplicamos por el factor 1.56 para tener en cuenta la corriente potencial en exceso.

$$\text{Corriente AC Total} = (10.4 A)(1.56) = 15.22 A \approx 16 A$$

En la figura 3.1.8.1 se muestra la instalación del interruptor cerca del tablero de cargas para un mejor acceso.



**Figura 3.1.8.1. Interruptores de AC**

### 3.2. Instalación del sistema fotovoltaico

En la instalación se realizó como primer paso la orientación por lo que se utilizó una brújula, la cual se colocó sobre el techo en una superficie plana para una orientación correcta de las estructuras hacia el sur.

El arreglo de los 15 paneles Fotovoltaicos en serie se fijó en la estructura de aluminio (Figura 3.2). Para su fijación se utilizaron tornillos de  $\frac{1}{4}$ " y se pusieron cuatro en cada panel, cada uno en cada uno en cada esquina del panel, sujetándose a la estructura. Se colocaron 4 paneles en cada estructura, por lo que fue un total de cuatro estructuras.



Figura 3.2. Montaje de sistema Fotovoltaico.

El inversor se instaló junto al sistema fotovoltaico para disminuir todas las pérdidas por la distancia que hay del sistema FV al sistema de iluminación (Figura 3.2.1).

Así mismo se aterrizaron todas las estructuras de aluminio y el inversor



**Figura 3.2.1. Sistema Fotovoltaico.**

La canalización del sistema eléctrico desde el sistema fotovoltaico hasta el sistema de iluminación del Laboratorio se hizo a través de tubería conduit galvanizado de 1 pulgada, para proteger el cableado de la exposición del medio ambiente. Se fijó al piso con abrazaderas para su adecuado funcionamiento como se muestra en la figura 3.2.2.



**Figura 3.2.2. Canalización del cableado.**

En el interior del Laboratorio el cableado se hizo a través de manguera conduit naranja flexible, para su mayor facilidad de movimiento.

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS

### 4.1. Energía Producida por el sistema Fotovoltaico

La mayor parte energía producida por el sistema FV está en función de la radiación y depende de la potencia y del rendimiento de la misma.

Todos los sistemas Fotovoltaicos tienen pérdidas energéticas originadas por distintos factores. Éstos tienen que ver en la disminución de la energía solar incidente con respecto a la real generada por el sistema FV e inyectada al sistema eléctrico.

La energía que se generará por este sistema Fotovoltaico durante la vida útil de los paneles, que es de 25 años, que son los años de rendimiento del sistema. La energía que se generará se calcula tomando como referencia los datos de la tabla 4.1

$$EG = \frac{P_{max} * No. de paneles * hp * 365 \text{ días} * No. de años}{1000} * 0.88$$

*EG = Energía Generada*

*P<sub>max</sub> = Potencia máxima del panel FV*

*hp = Horas solares pico*

*0.88 = Factor de reducción de capacidad normal, considera otras pérdidas del sistema (Incluyendo tolerancia de producción el módulo, acoplamiento deficiente entre los módulos, pérdidas en el cableado o alambrado, pérdidas por polvo, manchas, etc.) [15]*

**Tabla 4.1. Datos generales del sistema FV**

<b>Datos del sistema FV</b>	
<b>Número de paneles:</b>	15
<b>Potencia máxima de cada panel (W):</b>	200
<b>Horas solares pico en Querétaro (h):</b>	5.9

Sustituimos los datos en la ecuación y obtenemos:

$$EG = \frac{200 * 15 * 5.9 * 365 \text{ días} * 25}{1000} * 0.88 = 142,131 \text{ kW/h}$$

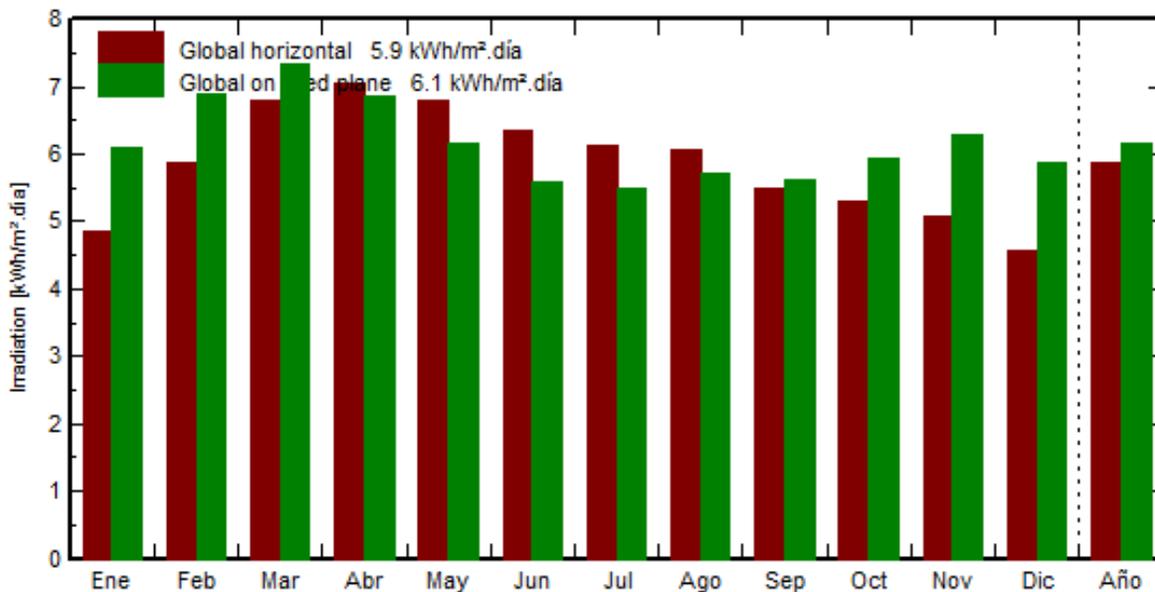
La energía total generada durante los años de vida útil del sistema es de 142, 131kW/h.

En la tabla 4.1.1se resume la energía producida anual, mensual y diaria que producirá el sistema FV.

**Tabla 4.1.1 Energía generada por el sistema FV**

Energía generada	
Anual	5685.24 kW/h
Mensual	473.77 kW/h
Diaria	15.79 kW/h

Se utilizó el programa PVSYST [16] para hacer una simulación, donde se ingresaron los datos de los paneles fotovoltaicos y del inversor, así como los de la ciudad de Querétaro. Como resultado de la simulación en el programa se muestra la comparación entre la radiación de la ciudad de Querétaro (Global horizontal 5.9 kWh/m<sup>2</sup>.d) y la radiación optimizada con la inclinación de la latitud (Global on tilted plane 6.1 kWh/m<sup>2</sup>.día) de las cuales se puede observar en que meses del año es más elevada la energía producida por el sistema FV, como se muestra en la figura 4.1.



**Figura 4.1. Energía producida de acuerdo a inclinación del sistema.**

La siguiente simulación también se hizo en el programa y se obtuvo la producción de energía (kWh/día) de cada mes durante un año como se muestra en la figura 4.1.1.

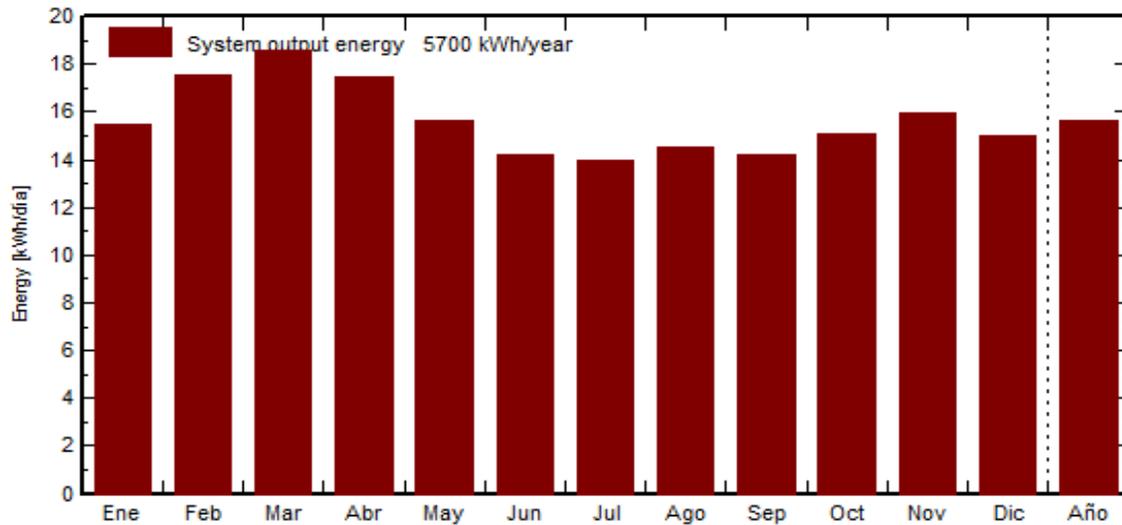


Figura 4.1.1. Energía (kWh/día) de cada mes durante un año

La tabla 4.1.1 resume los resultados obtenidos por la simulación en programa PVSYST, donde nos muestra Gl. horiz. que es cuando el sistema está puesto con la inclinación de la altitud del lugar, mientras que Coll. Plane, muestra los datos como si se tuviera un seguidor solar para siempre obtener la mejor captura de radiación en el sistema. En este caso el sistema esta con estructuras fijas pero se puede observar una diferencia pequeña en la energía total, así como las diferencias de producción durante todo el año, resumiendo en cuales meses se produciría más o se reduciría la generación de electricidad.

Tabla 4.1.1. Comparación de energía producida a diferente inclinación .

	Gl. horiz. kWh/m <sup>2</sup> .día	Coll. Plane kWh/m <sup>2</sup> .día	System output kWh/día	System output kWh
Ene.	4.84	6.10	15.51	481
Feb.	5.86	6.89	17.51	490
Mar.	6.80	7.32	18.61	577
Abr.	7.04	6.86	17.43	523
May.	6.80	6.16	15.66	486
Jun.	6.36	5.60	14.22	427
Jul.	6.14	5.48	13.93	432
Ago.	6.06	5.71	14.51	450
Sep.	5.49	5.61	14.24	427
Oct.	5.29	5.92	15.04	466
Nov.	5.09	6.27	15.94	478
Dic.	4.57	5.89	14.96	464
Año	5.86	6.15	15.62	5700

Los resultados obtenidos con el sistema PVSYST es un aproximado de lo que el sistema FV generará y puede variar de acuerdo diversos factores tales como clima, mantenimiento, desgaste, etc.

## 4.2. Estudio económico del Sistema Fotovoltaico

### 4.2.1. Costo del Sistema Fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico se demuestra rentable a partir del hecho de que la energía del sol es gratuita. El único costo es: la inversión inicial y el mantenimiento.

Para realizar el estudio económico, se toma en cuenta el costo total del material utilizado en el sistema FV (Tabla 4.2.1).

Tabla 4.2.1 Costo total del Sistema FV

Equipo	Cantidad	Precio unitario M.N.	Total M.N.
Módulo FV de 200W	15	4,682.75	70,241.23
Inversor Fronius IG3000	1	25,183.34	25,183.34
Estructuras de Aluminio	4	400	1,600
Cableado y material auxiliar	-	5,000	5,000
<b>Total</b>			<b>102,024.57</b>

De este modo el costo total aproximado del sistema fotovoltaico es de ciento dos mil veinticuatro punto cincuentaisiete pesos M.N

#### 4.2.2. Costo de energía eléctrica con el sistema fotovoltaico implementado

El tipo de tarifa que se tiene es HM de acuerdo al recibo de CFE de la Facultad de Ingeniería de la UAQ (Tabla 4.2.1), para el cálculo se tomó la tarifa de energía en punta que es de \$1.9588.

Se calculó el costo que se tiene diario de pago de electricidad sin sistema FV y se obtuvo lo siguiente.

**Datos:**

-Energía consumida por el sistema de iluminación: 56.39 kW/h

Tabla 4.2.2. Tarifa HM (CFE) [17]

Tarifa HM	Costo
Energía en base (kW/h)	\$0.9780
Energía en intermedia (kW/h)	\$1.1753
Energía en punta (kW/h)	\$1.9588

Costo de pago de electricidad del sistema de iluminación por día

$$\text{Costo diario} = (59.39 \text{ kW/h}) * (1.9588) = \$ 116.33$$

Ahora se calculó el costo que se tiene con el sistema FV implementado.

**Datos:**

-Energía consumida por el sistema de iluminación: 56.39 kW/h

-Energía producida diaria por el sistema FV: 15.79 kW/h

$$\text{Costo diario} = (59.39 \text{ kW/h} - 15.79 \text{ kW/h}) * (1.9588) = \$ 85.40$$

En la tabla 4.2.2.1 se muestra los resultados en resumen del ahorro que se generó en los costos de pago en electricidad.

Tabla 4.2.2.1 Ahorro de pago de energía eléctrica con sistema FV

<b>Luminarias sin sistema FV</b>	<b>Luminarias con sistema FV</b>
----------------------------------	----------------------------------

Descripción	Costo	Descripción	Costo
<b>Costo diario del sistema de iluminación sin Sistema Fotovoltaico</b>	\$116.33	Costo diario del sistema de iluminación con sistema Fotovoltaico	\$85.40
<b>Costo Bimestral</b>	\$6,979.8	Costo Bimestral	\$5,124
<b>Anual</b>	\$41,878.8	Anual	\$30,744

El ahorro que se obtendrá anualmente es de:

$$\text{Ahorro} = (\$41,878.8 - \$30,744) = \$11,134.8$$

#### 4.2.3. Retorno de la inversión

El siguiente estudio de viabilidad se extiende solo a los 25 años de vida pues son los años en los que el rendimiento de los módulos solares es mayor y porque un período de estudio superior provocaría una mayor incertidumbre.

Hay que tomar en cuenta que los primeros años son el tiempo de la recuperación de la inversión del sistema. A continuación se muestra el resultado del primer año en costo del sistema, se muestra en negativo ya que es la recuperación de lo invertido.

#### Datos:

-Costo del sistema FV: \$102,024.57

-Ahorro anual con sistema FV: \$11,134.8

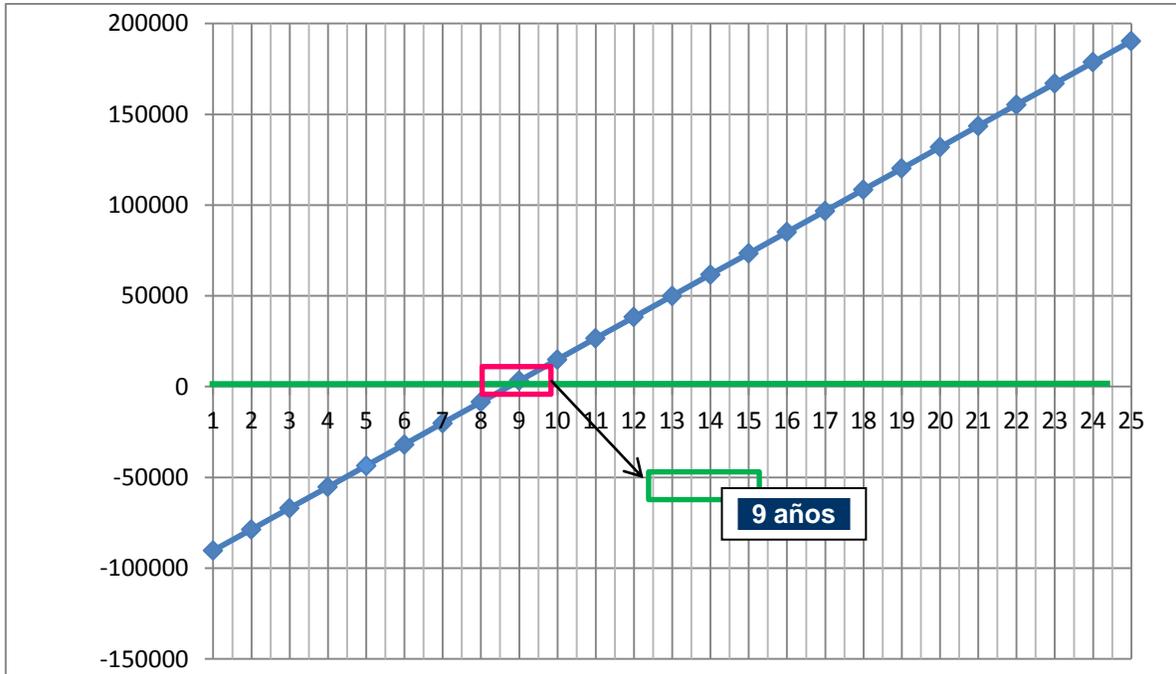
$$\text{Primer año} = (11,134.8 - 102,024.57) = -90,889.77$$

En la tabla 4.2.3 se muestra las pérdidas de los primeros años de retorno de la inversión así como las ganancias después de haber recuperado lo invertido durante los 25 años de la vida útil del sistema.

**Tabla 4.2.3 Retorno de inversión**

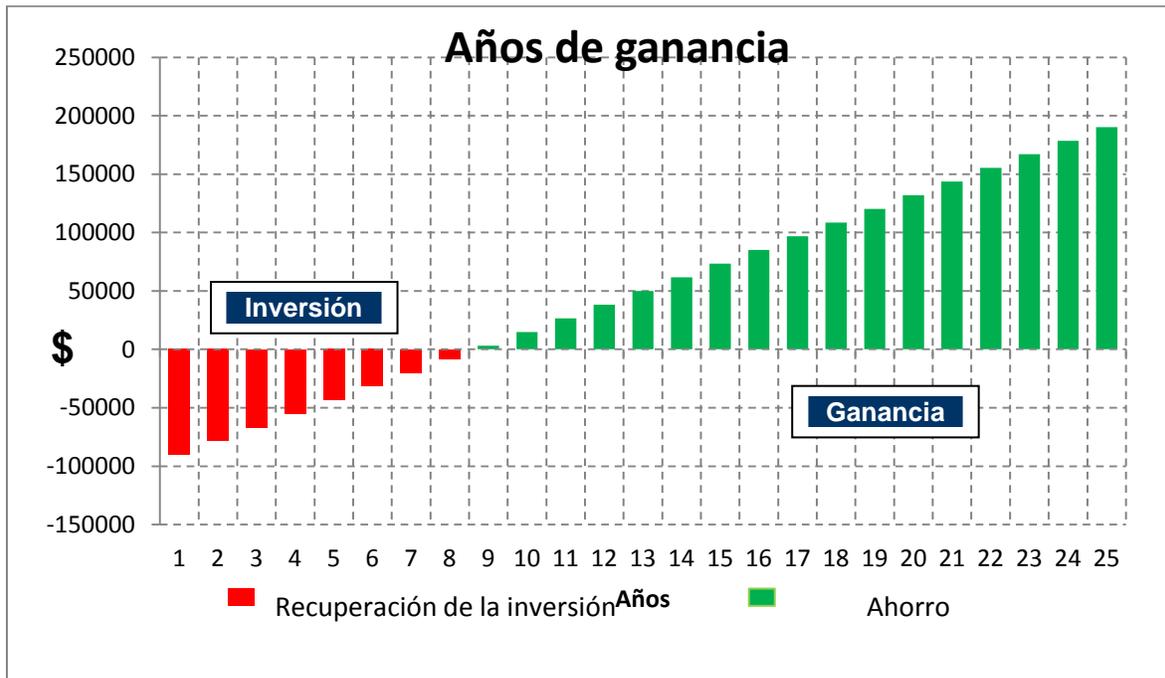
<b>Año</b>	<b>Inversión/Ganancia (\$)</b>
1	-90,889.77
2	-79,754.97
3	-68,620.17
4	-57,485.37
5	-46,350.57
6	-35,215.77
7	-24,080.97
8	-12,946.17
9	-1,811.37
10	9,323.43
11	20,458.23
12	31,593.03
13	42,727.83
14	53,862.63
15	64,997.43
16	76,132.23
17	87,267.03
18	98,401.83
19	109,536.63
20	120,671.43
21	131,806.23
22	142,941.03
23	154,075.83
24	165,210.63
25	176,345.43

De acuerdo a la figura 4.2.3 tomando en cuenta la inversión inicial y el ahorro generado por el sistema fotovoltaico, se proyecta que el periodo de retorno de la inversión será en 9 años por lo que el restante de vida de los paneles será de ganancia.



**Figura 4.2.3. Periodo de retorno de la inversión**

Por lo que a partir del noveno año son años de ganancia para el sistema. Tomando de la tabla 4.2.3 la ganancia total del sistema es de \$ 176,345.43. En la figura 4.2.3.1 se grafica la ganancia total del sistema a partir del noveno año.



**Figura 4.2.3.1 Grafica ganancia del sistema.**

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó la metodología e implantación de un sistema fotovoltaico, para uso en luminarias del Laboratorio de Automatización de la FI.

El Sistema FV cumple con una generación de energía eléctrica limpia, el máximo aprovechamiento de la radiación solar así como un ahorro económico considerable durante un periodo de tiempo.

Para la realización de los cálculos del sistema se basó en un estudio previo de iluminación del Laboratorio de Automatización, el cual tiene un consumo de 56.39 kW/h. así como también considerando los datos geográficos de la ciudad de Querétaro para la orientación e inclinación de las estructuras de los paneles fotovoltaicos. Partiendo de estos datos se diseñó e instaló el sistema Fotovoltaico interconectado a la red eléctrica pública, con un equivalente a un consumo de 28.2% por parte de las luminarias del laboratorio; este sistema se muestra en la figura 3.1.2, el cual se compone de 15 paneles y un inversor, con una capacidad instalada de 3 kW.

Los cálculos para el cableado y las protecciones se calcularon tomando en cuenta los datos técnicos de los paneles fotovoltaicos así como del inversor, basándose en la norma NOM-001-SEDE-2012.

El costo total del sistema fotovoltaico fue de \$102,024.57 MN., del cual, el retorno de inversión se proyecta en 9 años, por lo que el resto del tiempo de vida del sistema es ganancia. Se generará un ahorro de \$ 176,345.43. MN. después del retorno de la inversión

El sistema con el mantenimiento correcto mantendrá un buen resultado en la producción de energía. Cabe mencionar que la importancia que tiene la implementación de este proyecto es que se reducirá el consumo de energía eléctrica producida por restos fósiles que contaminan, y se utilizará energía limpia y renovable del sol.

## 6. Bibliografía

[1] Lozano Wendy (2013, Mayo). *Energías Renovables*, ProMéxico, extraído el 15 de Julio de 2013 desde <http://mim.promexico.gob.mx/work/sites>, México.

[2] Aguirre Humberto et al.,(2011, junio), *Ahorro de Energía Basado en el Estudio de Iluminación de un Laboratorio Escolar*, Universidad Autónoma de Querétaro.

[3] *Aeropuerto Solar en Querétaro el Primero en América Latina*, RefriNoticias,(06 de Diciembre 2010), desde <http://refrinoticias.com/>, Querétaro, México.

[4] Macías Bobadilla Gonzalo. (2009, Abril). *Sistema de Control y Monitoreo para Iluminación Autosustentable y de Alta Eficiencia para la Cafetería de la Facultad de Ingeniería utilizando Energías Renovables.*, Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), Querétaro, México.

[5] Muñoz Víctor (2008). *Estudio de Calidad y Ahorro de Energía Eléctrica en las Instalaciones de los Edificios Bernardo Quintana, Valdez Vallejo, DIMEI y 12 del Instituto de Ingeniería*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.

[6] Salinas M. (2012, Agosto 28). *Sistema Fotovoltaico de mayor potencia en el país con asesoría del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)*, Boletín No. 237, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

[7] M. Castro et al., (2011, Noviembre) *Grid-connected PV buildings: analysis of future scenarios with an example of Southern Spain*, p.1-5., España.

[8] J. Iglesias (2008). *Instalación fotovoltaica de 1MW en Pineda de Mar*, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

[9] Vicente Raya Narváez. (2009). *Estudio Técnico Económico de Instalación Fotovoltaica en cubierta y conectada a red en el Instituto de Enseñanza Secundaria "Francisco Salinas" de Salamanca*. Universidad Internacional de Andalucía, Salamanca, España.

[10] Víctor Herbert de León Morales. (2009). *Generación Eléctrica Fotovoltaica en la Facultad de Ingeniería USAC y el estudio del aprovechamiento.*, Universidad de San Carlos, Guatemala.

[11] (2011). *Renewable energies, Monash University*, Monash News, extraído el 26 de Julio de 2011 desde <http://www.monash.edu.au/news/>, Australia

[12] C. Orndoff et al. (2010). *Public Institution fast Tracking Solar Panel Array Implementation*. Sustainable Systems and Technology. ISST' 09. IEE International Symposium

[13]<http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=20.6&lon=-100.40&submit=Presentar+Nasa.gov>. [consulta: 4 de julio 2013]

[14]Manual Fronius IG Fronius IG 2000 / 3000 / 2500-LV  
[http://www.fronius.com.mx/cps/rde/xbcr/SID-2FA84427-CA6037B0/fronius\\_mexico/42\\_0410\\_1799\\_260254\\_snapshot.pdf](http://www.fronius.com.mx/cps/rde/xbcr/SID-2FA84427-CA6037B0/fronius_mexico/42_0410_1799_260254_snapshot.pdf)[consulta:11 de Agosto 2013]

[15] Energy Internacional, (2008). *Fotovoltaica: Manual de diseño e Instalación* Editorial SEI

[16] PVSYST, (Agosto 2012), desde <http://www.pvsyst.com/en/>

[17] *Comisión Federal de Electricidad*, (Agosto 2012), desde <http://www.cfe.gob.mx/paginas/home.aspx>

## 7. APÉNDICE

### APÉNDICE A – Hoja de datos técnicos del Panel Fotovoltaico

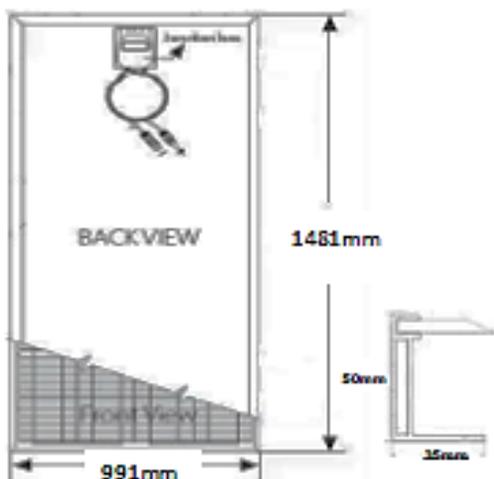


ERDM 200SP/6

#### Características Eléctricas

Características	ERDM 200SP/6
Voltaje en Circuito Abierto (Voc)	32.99 V
Voltaje de Operación Óptimo (Vmp)	25.98 V
Corriente de Cortocircuito (Isc)	8.26 A
Corriente de Operación Óptima (Imp)	7.75 A
Potencia Máxima en STC (Pmax)	200 W
Temperatura de Operación (°C)	-40 to 90
Máximo Voltaje del Sistema	1000 V
Máximo Valor del Fusible	15 A
Tolerancia de Potencia	+/- 3 %
Eficiencia	13.6 %

STC: Irradiancia 1000 W/m<sup>2</sup>, Temperatura del Módulo 25°C, AM=1.5



#### Características Mecánicas

Celda Solar	Policristalina
No. De Celdas	54
Dimensiones	1481mm x 991mm x 50mm
Peso Aprox.	20 Kg
Cristal Frontal	Cristal Templado de 4mm
Marco	Aluminio Anodizado
Caja De Conexión	LAPP Epic Solar ST200 IP65
Cables De Salida	LAPP Epic Solar 4mm

#### Coefficientes de Temperatura

Coefficiente de temperatura de Potencia (Pmax)	-0.45 %/°k
Coefficiente de temperatura de Voltaje (Voc)	-0.34 %/°k
Coefficiente de temperatura de Corriente (Isc)	0.05 %/°k

#### IV- Curva (Celda)



Condiciones de prueba estándar STC: Radiación 1000 w/m<sup>2</sup> con un espectro de AM 1.5 con una temperatura en la celda de 25°C.  
 Válido para todas las medidas: +/- 2 mm Sujeto a alteraciones técnicas.  
 Tolerancias de hoja de datos +/- 3 % (excepto los datos de potencia máxima) Medidas de tolerancia +/- 3 %

## APÉNDICE B – Datos técnicos generales del Inversor Fronius IG 3000

Fronius IG 3000

### Datos de entrada

Potencia recomendada de la Instalación fotovoltaica	2000 -3300 Wp
Gama de tensión MPP	150 - 400 V DC
Máxima tensión de entrada (con 1000 W/m <sup>2</sup> / 14 °C en marcha sin carga)	500 V DC
Tensión de entrada nominal	280 V
Corriente de entrada nominal	10.0 A
Máxima corriente de entrada	18 A
Máxima corriente de cortocircuito de los módulos solares	25 A

### Datos de salida

Potencia de salida nominal ( $P_{nom}$ )	2500 W*
$P_{nom}$ con +122 °F (50 °C)	2000 W
Máxima potencia de salida	2700 W
Tensión de red nominal	240 V
Tolerancia de la red	+10 / -12 %
Margen de tensión de servicio AC	212 - 264 V
Margen de ajuste de la tensión de red	180 - 270 V
Precisión de los límites de tensión	± 1.5 % del valor nominal
Corriente de salida nominal	10.4 A AC
Fases	1
Máxima corriente Inversa de la empresa suministradora de energía **	0 A
Asalto de sincronización de corriente **	0 A
Máxima corriente de falta de salida por período de tiempo	11.25 A / 60 ms
Máxima protección por fusible contra exceso de corriente AC	20 A
Frecuencia de salida nominal	60 Hz
Margen de frecuencia de salida	59.3 - 60.5 Hz
Margen de ajuste de la frecuencia de red	57.0 - 60.5 Hz
Precisión de los límites de frecuencia	± 0.02 Hz
Coefficiente de distorsión no lineal	< 5 %
Factor de potencia Cos phi (con potencia de salida nominal)	1

\* Válido con 104 °F (40 °C) cuando la tensión de servicio DC es > 200 V

\*\* Asegurado mediante la construcción eléctrica del Inversor

## APÉNDICE C – Tabla 310-15(b) (16) Capacidad permisible en conductores Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012

Tabla 310-15(b)(16) Ampacidades permisibles en conductores aislados para tensiones hasta 2000 volts y 60 °C a 90 °C. No más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o directamente enterrados, basados en una temperatura ambiente de 30 °C\*

Tamaño o designación		Temperatura nominal del conductor [Véase la tabla 310-104(a)]					
		60 °C	75 °C	90 °C	60 °C	75 °C	90 °C
mm <sup>2</sup>	AWG o kcmil			TIPOS TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THHW-LS, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2			
		TIPOS TW, UF	TIPOS RHW, THHW, THHW-LS, THW, THW-LS, THWN, XHHW, USE, ZW		TIPOS UF	TIPOS RHW, XHHW, USE	TIPOS SA, SIS, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2
		COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE		
0.824	18**	—	—	14	—	—	—
1.31	16**	—	—	18	—	—	—
2.08	14**	15	20	25	—	—	—
3.31	12**	20	25	30	—	—	—
5.26	10**	30	35	40	—	—	—
8.37	8	40	50	55	—	—	—
13.3	6	55	65	75	40	50	55
21.2	4	70	85	95	55	65	75
26.7	3	85	100	115	65	75	85
33.6	2	95	115	130	75	90	100
42.4	1	110	130	145	85	100	115
53.49	1/0	125	150	170	100	120	135
67.43	2/0	145	175	195	115	135	150
85.01	3/0	165	200	225	130	155	175
107.2	4/0	195	230	260	150	180	205
127	250	215	255	290	170	205	230
152	300	240	285	320	195	230	260
177	350	260	310	350	210	250	280
203	400	280	335	380	225	270	305
253	500	320	380	430	260	310	350
304	600	350	420	475	285	340	385
355	700	385	460	520	315	375	425
380	750	400	475	535	320	385	435
405	800	410	490	555	330	395	445
456	900	435	520	585	355	425	480
507	1000	455	545	615	375	445	500
633	1250	495	590	665	405	485	545
760	1500	525	625	705	435	520	585
887	1750	545	650	735	455	545	615
1013	2000	555	665	750	470	560	630

\* Véase 310-15(b)(2) para los factores de corrección de la ampacidad cuando la temperatura ambiente es diferente a 30 °C.

\*\* Véase 240-4(d) para limitaciones de protección contra sobrecorriente del conductor.

# APÉNDICE D – Recibos de electricidad



Av. Paseo de la Reforma Num. 164  
Col. Juárez, México, D.F. 06600  
RFC: CFE370814-Q10

**Nombre y Domicilio:**  
UNIVERSIDAD AUT DE QRO  
CENT UNIV C CAMP T 163242  
CENTRO  
QUERETARO, QRO.

Número de servicio:

076 781 100 605

Total a pagar:

**\$217,157.00**

(DOSCIENTOS DIECISIETE MIL CIENTO CINCUENTA Y SIETE PESOS 00/100 M.N.)

Fecha limite de pago:

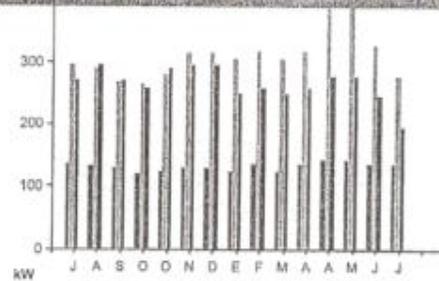
15 AGO 11

Ruta: B2DP09A018200180  
Periodo: 30 JUN 11 A 31 JUL 11  
No. Medidor: Y371M5

Tarifa: HM  
Carga conectada kW: 440  
Demanda contratada kW: 440  
Multiplicador: 600

Descripción y periodo	Lectura actual	Lectura anterior	Diferencia	Totales
kWh base				28,440
kWh intermedia				68,160
kWh punta				6,360
kW base				135
kW intermedia				280
kW punta				197
kVArh				68,020
Factor de potencia M				78.01

Datos Históricos



Conceptos	Totales	Precios unitarios
Energía en base kWh	28,440	0.97600
Energía en intermedia kWh	68,160	1.17530
Energía en punta kWh	6,360	1.95880
Demanda facturable kW	222	168.43000

Mes	Demanda máxima kW	Consumo total kWh	F.P. %	F.C. %	Precio medio
JUL 10	205	95,040	80.92	53	1.4415
AGO 10	270	128,100	83.59	55	1.4325
SEP 10	287	123,000	81.32	53	1.4878
OCT 10	281	122,520	81.29	57	1.3926
OCT 10	281	2,700	86.90	38	1.8710
NOV 10	297	118,020	80.63	55	1.5525
DIC 10	273	100,740	75.88	50	1.5937
ENE 11	263	101,400	76.38	51	1.6482
FEB 11	293	108,880	79.69	54	1.6684
MAR 11	304	123,900	81.28	53	1.6370
ABR 11	287	7,740	80.82	53	1.5804
ABR 11	278	98,000	78.18	45	1.6105
MAY 11	312	133,380	82.95	48	1.5925
JUN 11	273	121,320	81.66	51	1.6276
JUL 11	222	102,960	76.01	49	1.7009

**Avisos Importantes**

- De acuerdo a tus instrucciones, el importe de este aviso-recibo será cargado a tu cuenta bancaria.
- Nos transformamos para servirte mejor.
- Servicio a Clientes Teléfono 071.
- La capacitación del personal en medidas de eficiencia energética reduce costos... ¡Ahórrate una luz!



Factura: PE  
Folio: 000004421727  
No. aprobación: 77002  
Año de aprobación: 2009  
No. certificado: 00001000000100609817

Conceptos	Estado de cuenta	Importe \$
Energía		120,380.73
Demanda Facturable		37,391.46
Cargo Factor de Potencia		17,354.84
Subtotal		175,127.13
IVA 16%		28,020.34
Facturación del Periodo		203,147.47
Derecho de Alumbrado Público 0.9%		14,010.17
Adeudo Anterior		244,846.28
Su Pago		-244,846.00
<b>Total</b>		<b>\$217,157.92</b>



## APÉNDICE E – Artículo expuesto en la VII Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de energía y educación Energética. CIER 2011-La Habana, Cuba

### Ahorro de Energía Basado en el Estudio de Iluminación de un Laboratorio Escolar.

Martínez Robles, Julia Marcela (1); Aguirre Becerra, Humberto (1); Avendaño Juárez, José Luis (1),  
García Romero, Roberto (1)

(1) Universidad Autónoma de Querétaro, México.  
[luis.avendano@uaq.mx](mailto:luis.avendano@uaq.mx)

#### Resumen:

En México, la ciudad de Querétaro es privilegiada al recibir una radiación solar promedio de 5.9 kWh/m<sup>2</sup>-día lo que permite usar paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica. El presente trabajo se implementó en el Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, México. El proyecto se enfocó en estudiar un sistema de iluminación ya establecido y en base a esto proponer un sistema de paneles fotovoltaicos. El primer objetivo fue calcular el consumo total de energía eléctrica consumida por el sistema de iluminación del laboratorio, después; se midió la luminosidad en las áreas del Laboratorio y se corroboró junto con la Norma vigente en México que se tenía un exceso de iluminación en algunas áreas; lo anterior produjo una reducción en las luminarias del sistema de iluminación. Posteriormente; se repitió el estudio para verificar los resultados. Finalmente; se realizaron los cálculos para un sistema de paneles fotovoltaicos interconectado a la red junto con las adecuaciones a las instalaciones eléctricas, los resultados se corroboraron en el programa HOMER.

**Palabras clave:** Sistemas fotovoltaicos, sistemas interconectados a la red, ahorro de energía, HOMER.

### Energy Saving Based on a Lighting Study of a School Laboratory

Martínez Robles, Julia Marcela (1); Aguirre Becerra, Humberto (1); Avendaño Juárez, José Luis (1),  
García Romero, Roberto (1)

(1) Universidad Autónoma de Querétaro, México.  
[luis.avendano@uaq.mx](mailto:luis.avendano@uaq.mx)

#### Abstract:

In México, Querétaro City is privileged to receive an average solar radiation of 5.9 kWh/m<sup>2</sup>-day, allowing the implementation of a photovoltaic electricity generation system. This work was implemented in the Automation Laboratory located on the Engineering Faculty of the Universidad Autónoma de Querétaro, México. The project focused on the study of the pre-existing lighting system; and based on this, a photovoltaic panel system will be proposed. The first objective was to calculate the total power consumption of the laboratory lighting system; then, the measurement of the areas luminosity of the Laboratory was made and it was corroborated with the Mexican Norm (NOM025-STPS-2008) that there was an excess of lighting in some areas, resulting in a reduction in the lighting system. Subsequently, the lighting study was repeated to verify the new results. Finally, calculations were done for a grid-connected photovoltaic system along with the adjustments to the electrical installation. The results were corroborated in HOMER, a program use for the economical analysis and electrical design of photovoltaic system.

**Keywords:** Photovoltaic system, grid-connected PV array, energy saving, HOMER

## 1. INTRODUCCIÓN.

Las fuentes convencionales de energía han creado incontables problemas ambientales tales como el calentamiento global, lluvias ácidas, smog, contaminación del agua, vertederos de residuales, destrucción de hábitats y pérdida de recursos naturales [4]. En la actualidad, el uso de energías alternativas permite la disminución de los contaminantes producidos por la generación de electricidad. Los sistemas fotovoltaicos producen electricidad directamente de la luz solar, generando energía limpia y confiable sin consumir combustibles fósiles y se pueden usar en una amplia variedad de aplicaciones. Un ejemplo de esta tecnología son los arreglos o matrices de sistemas FV para abastecer a los consumidores con electricidad, o como sistema de respaldo para equipo crítico [4]. La capacidad instalada a nivel mundial de sistemas fotovoltaicos en el 2009 fue de 22 GW [3].

En México, la empresa encargada de producir energía eléctrica es la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la cual produce un 50.11% de la misma mediante el uso de hidrocarburos y carbón [1]. Uno de los más grandes problemas a los que se está enfrentando el país es la generación de energía, debido a que los recursos no renovables como el petróleo se están terminando, lo que en un futuro traerá problemas para el abastecimiento de electricidad a la población; además, es importante mencionar que la falta de cultura de los ciudadanos en el uso responsable de la electricidad tiene como consecuencia el desperdicio de este recurso y la necesidad de generar más. Los investigadores en el mundo y México han realizado grandes esfuerzos para reducir el consumo de energía eléctrica y evitar el desperdicio de la misma, mediante estudios y propuestas de ahorro, como por ejemplo: En [5] se presenta el estudio de calidad y ahorro de energía eléctrica en las instalaciones de los edificios Bernardo Quintana, Valdez Vallejo DIMEI y 12 del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y establece la importancia de implementar u operar programas redituables de energía cuya estrategia central sea el ahorro y la eficiencia de la misma, teniendo en cuenta la importancia de conocer el tipo y la cantidad de energía que se utiliza en cada uno de los procesos que conforman la operación de una organización. En [6] se presenta un proyecto para el ahorro de electricidad en un salón de clases en el Instituto Politécnico Nacional (IPN, México); el objetivo fundamental de este proyecto fue la implementación de un método que gobierne el sistema de alumbrado y que proporcione la iluminación adecuada al confort humano y que genere un ahorro en el consumo de electricidad. Así mismo, en [7], [11] y [12] se explica el trabajo de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa de la Ciudad de México con la colaboración del Instituto de Investigación Eléctrica (IIE) en la construcción un Laboratorio de Energía Fotovoltaica para proveerse de 60 KW de electricidad. A nivel internacional, en [8] se habla sobre la implementación de uno de los arreglos de paneles solares más grandes en Estados Unidos en la Universidad del Golfo de Florida que incluye la preparación del terreno y cuyo tiempo de instalación constará de menos de un año; el sistema producirá 2 MW por día previendo energía a más de 2,500 estudiantes. Además, la Unión Europea planea en el Salvador un impacto educativo muy importante con la inclusión de la tecnología en los procesos de enseñanza-aprendizaje; el programa se llama Euro-Solar, mediante el cual donarán paneles solares a las escuelas, así como todo el equipo para transformar la energía solar en electricidad. En [9] se plantea un análisis sobre la opción de instalar un sistema de Energía Renovable por medio de paneles fotovoltaicos, para la alimentación de energía eléctrica en la iluminación del Edificio T-6, de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos, Guatemala, utilizando la modalidad de Generador Distribuidor Renovable. Así mismo, en [10] se presenta la instalación de una amplia red de paneles solares del campus Clayton de la Monash University de Australia, siendo el generador fotovoltaico más grande en cualquier universidad de Australia generando alrededor de 100,000 kWh de electricidad al año; el sistema cuenta con 416 paneles solares instalados en el techo del Centro de Campus.

La motivación de este trabajo es presentar una propuesta de ahorro en la energía eléctrica del sistema de iluminación en el Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), México. La aportación principal del trabajo radica en la realización de un estudio previo al sistema de iluminación preestablecido con lo cual se verifica si existe un exceso o una deficiencia en el número de lámparas, dicho estudio es útil para los casos en los cuales los sistemas de iluminación que se encuentran instalados no son de última generación; y se pretende utilizar paneles fotovoltaicos para el ahorro de energía eléctrica en los sistemas de iluminación. El estudio puede ayudar para reducir los costos en la implementación del sistema de paneles y esto se puede verificar a través de un programa de simulación, en este caso se usó el HOMER para verificar los cálculos del sistema propuesto.

El trabajo está dividido de la siguiente forma: la sección dos se describe el caso de estudio, en la parte tres se presenta la metodología utilizada, los resultados y conclusiones son discutidos en la sección cuatro y cinco respectivamente.

## **2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.**

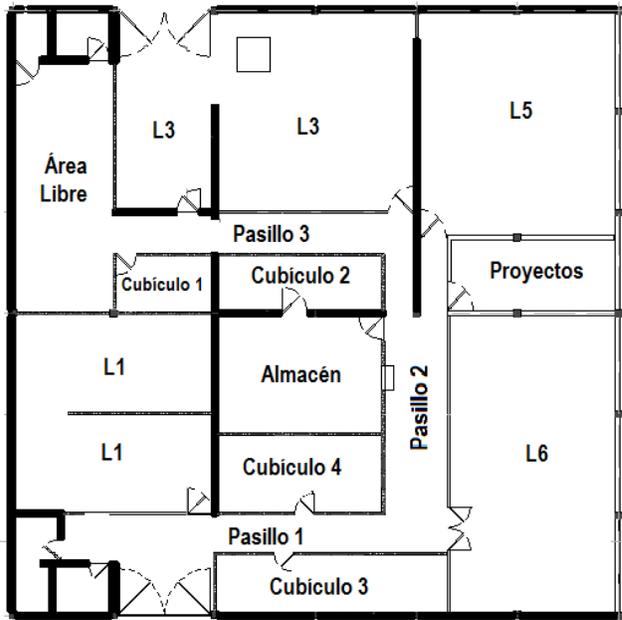
En México, el municipio de Querétaro es privilegiado al recibir una radiación solar promedio de 5.9 kWh/m<sup>2</sup>-día lo que permite usar paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica [2]. Uno de los principales problemas que presentan las escuelas en México es el alto desperdicio que se tiene por mantener siempre iluminadas las áreas que las componen, (salones, áreas administrativas, laboratorios, etc.) sin importar si es un área que tiene iluminación natural o que no se encuentre en uso durante largos periodos de tiempo. Este tipo de problemas provoca que la demanda de energía sea constante y que en muchas ocasiones sea mal aprovechada. Por otro lado, en muchas áreas que se construyeron hace varias décadas no se tomó en cuenta el uso de la luz natural para iluminar las áreas durante el día y ocupar la energía eléctrica sólo durante la noche.

Lo descrito en el párrafo anterior ha provocado que en las instituciones educativas y centros de investigación involucrados con la aplicación de energías alternativas busquen la manera de ahorrar electricidad mediante la aplicación de estas. Es por esto, que los esfuerzos de algunos de los investigadores de la FI de la UAQ se hayan centrado en la aplicación de estas energías, en particular la energía solar, para la generación de electricidad y así reducir el gasto por el consumo de este servicio.

El caso de estudio que se presenta en este trabajo es el Laboratorio de la carrera de Automatización de la FI de la UAQ [1], que cuenta con una superficie de 576 m<sup>2</sup> y con la distribución que se presenta en el Esquema 1. El Laboratorio presta servicio de las 7:00 a las 22:00 h por lo que existen áreas que todo el día se mantienen iluminadas y otras que sólo por un periodo de tiempo se mantienen encendidas. En la Tabla No. 1, se presentan los valores que corresponden al consumo de energía por cada área del laboratorio, se observa que el área que más demanda es el pasillo porque se mantiene prendido las 24 hrs.

Esquema 1. Distribución de las áreas del laboratorio bajo estudio.

Tabla No. 1. Consumo de las áreas que componen al laboratorio.



Área	Número de lámparas	Horas encendido	Consumo (KWh)
L6	16	13	11.648
L5	16	13	11.648
L3	14	6	4.704
L4	6	13	4.368
L1	20	13	14.56
Cubículo 4	4	8	1.792
Cubículo 3	4	8	1.792
Cubículo 1	3	8	1.344
Proyectos	4	6	1.344
Almacén	10	15	8.4
Pasillo	18	24	24.192
Área Libre	8	15	6.72
Cubículo 2	5	9	2.52
<b>Total</b>	<b>128</b>		<b>95.032</b>

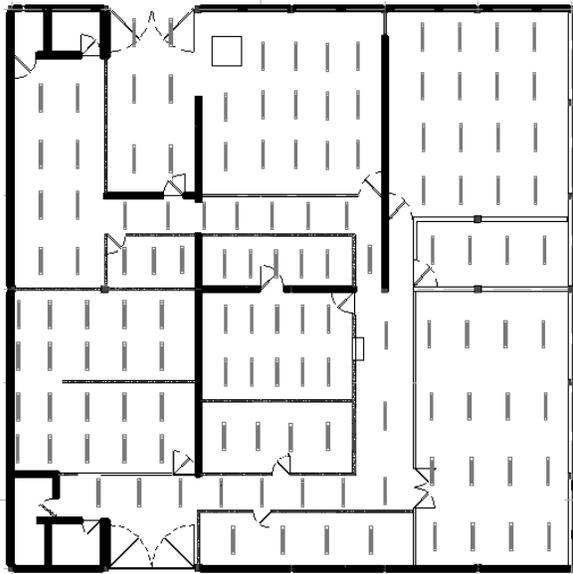
### 3. METODOLOGÍA.

#### 3.1. Estudio del sistema de iluminación previo.

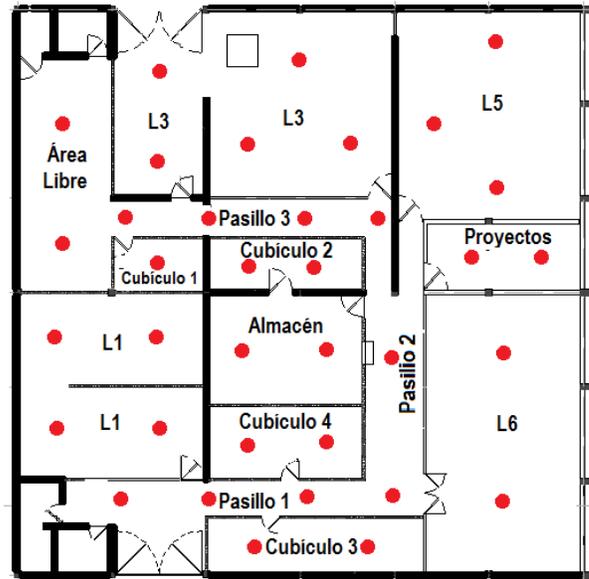
Una vez identificadas las áreas de estudio, se ubicaron las lámparas dentro del laboratorio como lo muestra el Esquema No. 2. Cada lámpara tiene un consumo de 56 W con un factor de potencia de 0.5 y con una alimentación de 127 VAC [13]; el total de lámparas instaladas en el laboratorio era de 128. El factor de potencia medido de todo el laboratorio fue de 0.63.

Posteriormente se eligieron los puntos estratégicos donde se hizo el estudio de iluminación. Estos puntos fueron escogidos de acuerdo al nivel de uso y concurrencia por parte de los usuarios del laboratorio, tal como se muestra en el Esquema 3. La medición fue tomada a 2.45 m de las lámparas (en el suelo del laboratorio), lo que corresponde al mínimo de iluminación. El instrumento utilizado para la medición fue un luxómetro marca SAMPOMETER, modelo LX1010BS, el cual tiene una resolución de un 1 lux, una repetibilidad de  $\pm 2.0\%$  y un rango de 0 – 100 000 lux [14].

Esquema 2. Distribución inicial de lámparas en el Laboratorio de Automatización



Esquema 3. Puntos de medición de iluminación de las áreas del Laboratorio de Automatización



Se tomaron dos tipos de mediciones; la primera fue con todas las luces encendidas del laboratorio, tomando en cuenta que la interferencia de las áreas adjuntas al punto de medición ayuda a incrementar la luminosidad de la zona; mientras que la segunda fue el área individual, lo que implica que solo esa área estaba iluminada. Se tomaron cinco mediciones en cada punto cinco en una semana (una por día, de lunes a viernes) a las 22:00 para evitar que factores externos alteraran el resultado de las mediciones. La Tabla No. 2, muestra los resultados obtenidos de la toma de datos con todas las áreas iluminadas y la Tabla No. 3, presenta las mediciones del área individual. La primera columna de cada Tabla muestra el área de estudio, la segunda columna muestra el promedio de las cinco mediciones realizadas, la tercera columna muestra el valor mínimo establecido por la norma (NOM025-STPS-2008), y por último la cuarta columna muestra el exceso de iluminación.

Tabla No. 2. Resultado del estudio de iluminación con todas las áreas iluminadas.

Área	Promedio (luxes)	Valor Mínimo (luxes)	Exceso (luxes)
Pasillo 1	616.8	100.0	516.8
Pasillo 2	597.1	100.0	497.1
Pasillo 3	826.9	100.0	726.9
Área Libre	898.9	300.0	598.9
Cubículo 1	895.2	300.0	595.2
L3	750.1	300.0	450.1
Proyectos	659.3	300.0	359.3
L5	667.4	300.0	367.4
L6	622.0	300.0	322.0
Almacén	303.9	200.0	103.9
Cubículo 2	696.7	300.0	396.7
Cubículo 3	667.2	300.0	367.2
Cubículo 4	739.0	300.0	439.0
L1	950.9	300.0	650.9

Tabla No. 3. Resultado del estudio de iluminación por área.

Área	Promedio (luxes)	Valor Mínimo (luxes)	Exceso (luxes)
Pasillo 1	418.1	100.0	318.1
Pasillo 2	340.3	100.0	240.3
Pasillo 3	440.3	100.0	340.3
Área Libre	700.9	300.0	400.9
Cubículo 1	646.2	300.0	346.2
L3	625.4	300.0	325.4
Proyectos	498.0	300.0	198.0
L5	608.5	300.0	308.5
L6	559.1	300.0	259.1
Almacén	283.1	200.0	83.1
Cubículo 2	555.2	300.0	255.2
Cubículo 3	501.1	300.0	201.1
Cubículo 4	603.3	300.0	303.3
L1	892.3	300.0	592.3

### 3.2. Adecuaciones al sistema de iluminación.

#### 3.2.1. Mejoras al sistema de iluminación.

De acuerdo a las Tabla No. 2 y 3 se determinó que había un exceso de iluminación en la mayoría de las áreas del laboratorio, por lo que se decidió reducir el número de luminarias, proponiendo un nuevo arreglo en el sistema tal y como se muestra en el Esquema 4, con un total de 75 lámparas, 53 lámparas menos que el sistema original.

#### 3.2.2. Estudio del nuevo sistema de iluminación.

Al sistema modificado se le hicieron las mismas pruebas de iluminación que al anterior, arrojando los resultados mostrados en la Tabla No. 4 y 5. También se calculó el nuevo consumo de energía total y por área del laboratorio tal y como se muestra en la Tabla No. 6.

Esquema 4. Nueva distribución de lámparas del Laboratorio de Automatización.

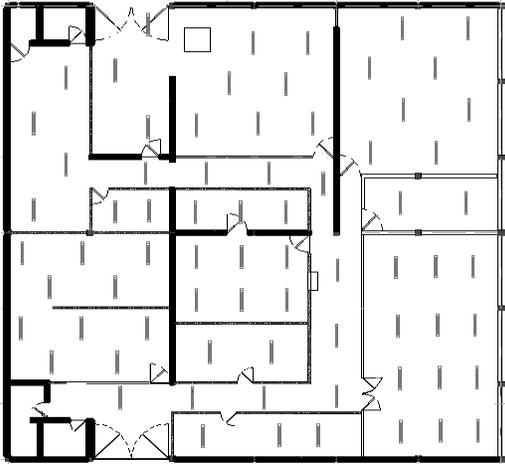


Tabla No 4. Consumo del sistema de iluminación modificado.

Área	Número de lámparas	Horas encendido	Consumo (KWh)
L6	12	13	8.736
L5	8	13	5.824
L3	7	6	2.352
L4	3	13	2.184
L1	10	13	7.28
Cubículo 4	2	8	0.896
Cubículo 3	3	8	1.344
Cubículo 1	2	8	0.896
Proyectos	2	6	0.672
Almacén	10	15	8.4
Pasillo	10	24	13.44
Área Libre	4	15	3.36
Cubículo 2	2	9	1.008
Total	75		56.392

Tabla No. 5. Resultado del estudio de iluminación con todas las áreas iluminadas del nuevo sistema de iluminación.

Área	Promedio (luxes)	Valor Mínimo (luxes)	Exceso (luxes)
Pasillo 1	235.3	100.0	135.3
Pasillo 2	335.5	100.0	235.5
Pasillo 3	237.0	100.0	137.0
Área Libre	301.5	300.0	1.5
Cubículo 1	387.0	300.0	87.0
L3	332.6	300.0	32.6
Proyectos	304.5	300.0	4.5
L5	300.0	300.0	0.0
L6	464.5	300.0	164.5
Almacén	207.0	200.0	7.0
Cubículo 2	302.0	300.0	2.0
Cubículo 3	307.0	300.0	7.0
Cubículo 4	314.0	300.0	14.0
L1	405.8	300.0	105.8

Tabla No. 6. Resultado del estudio de iluminación por área del nuevo sistema de iluminación.

Área	Promedio (luxes)	Valor Mínimo (luxes)	Exceso (luxes)
Pasillo 1	336.6	100.0	236.6
Pasillo 2	365.0	100.0	265.0
Pasillo 3	406.3	100.0	306.3
Área Libre	449.3	300.0	149.3
Cubículo 1	550.0	300.0	250.0
L3	317.2	300.0	17.2
Proyectos	312.3	300.0	12.3
L5	318.7	300.0	18.7
L6	494.3	300.0	194.3
Almacén	223.0	200.0	23.0
Cubículo 2	331.8	300.0	31.8
Cubículo 3	414.8	300.0	114.8
Cubículo 4	387.5	300.0	87.5
L1	463.3	300.0	163.3

### 3.3. Propuesta del sistema de paneles fotovoltaicos.

Se decidió proponer un sistema de paneles fotovoltaicos interconectado a la red de CFE equivalente al 25% de las lámparas instaladas en el laboratorio. A continuación se muestra una descripción del sistema:

Número de paneles:	15
Potencia de cada panel (W):	200
Voltaje nominal de cada panel (V):	18
Corriente nominal de cada panel (A)	8.34
Potencia Instalada (W):	3000
Horas solares pico en Querétaro (h):	5.9
Energía generada (kWh):	17.7
Energía generada con 95% de eficiencia (kWh):	16.82

El sistema se compone de un arreglo de 15 paneles conectados en serie. Al estar en serie la corriente del sistema es de 8.34 A y un voltaje entre la terminal positiva y la terminal negativa de 360 VCD. El inversor de corriente tomado en cuenta para este sistema es de marca KACO blueplanet, modelo 2502xi, de 3 kW de potencia máxima instalada de PV, con una alimentación en un rango de voltaje de 200 a 450 VCD con una eficiencia del 95%. La el Esquema 5 muestra el sistema propuesto de paneles fotovoltaicos.

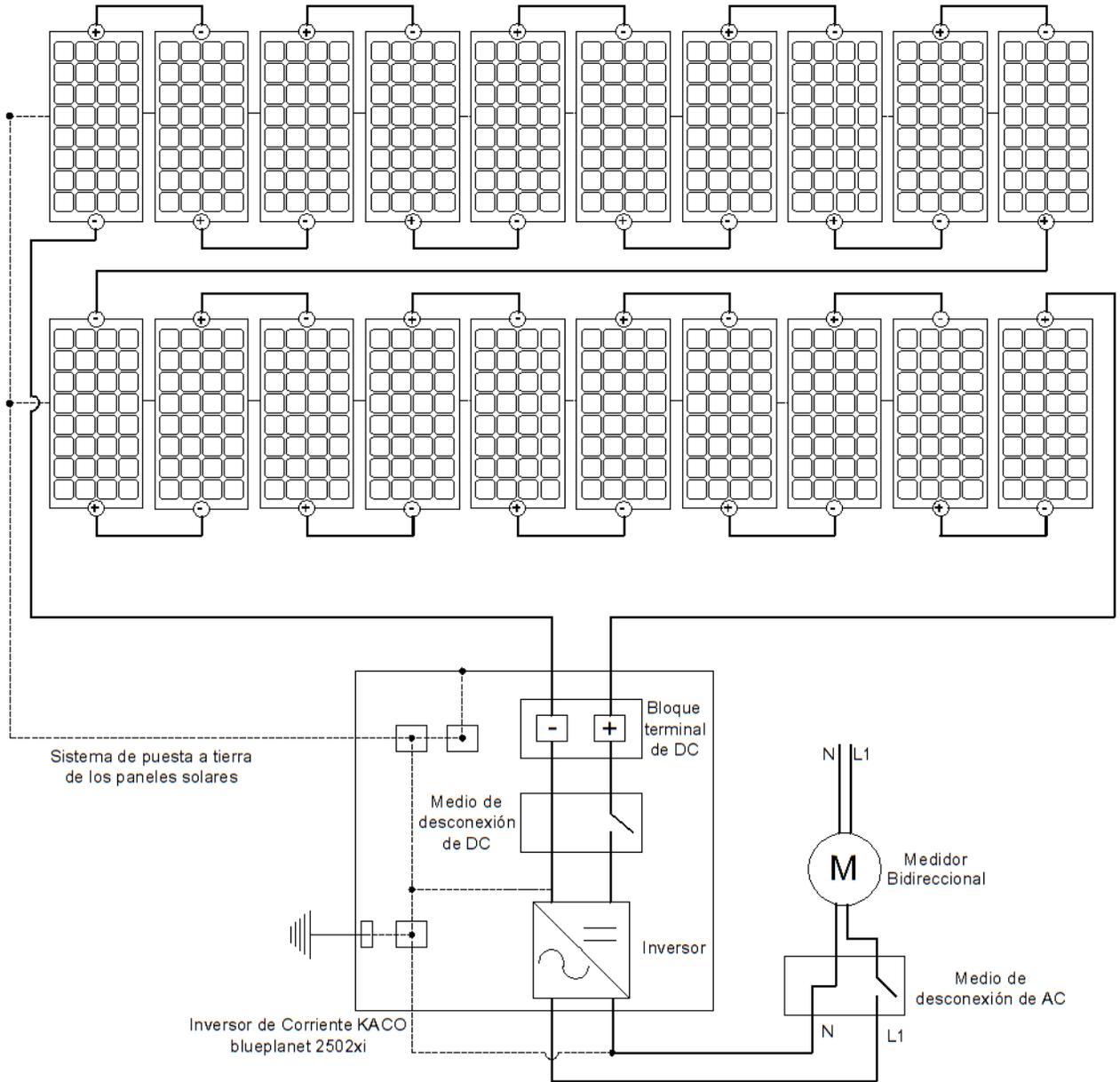
El beneficio de ser un sistema interconectado a la red es que no se necesita un controlador de carga ni pilas para almacenar la energía. La energía producida es descontada directamente en el recibo de pago de energía eléctrica. La desventaja de un sistema interconectado a la red es que en caso de que el suministro de energía por parte de la compañía generadora falle, el sistema de paneles fotovoltaicos no podrá alimentar las cargas del laboratorio.

### 3.4. Validación del sistema de paneles fotovoltaicos mediante simulador.

Se realizó la simulación de la energía promedio anual captada, utilizando el programa Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER), que permite visualizar las dependencias entre los parámetros geográficos y la energía captada, y a partir de ahí analizar y obtener

conclusiones sobre la cantidad de energía que producirá el sistema de acuerdo a los niveles de irradiación durante cada mes.

Esquema 5. Sistema propuesto de paneles fotovoltaicos.

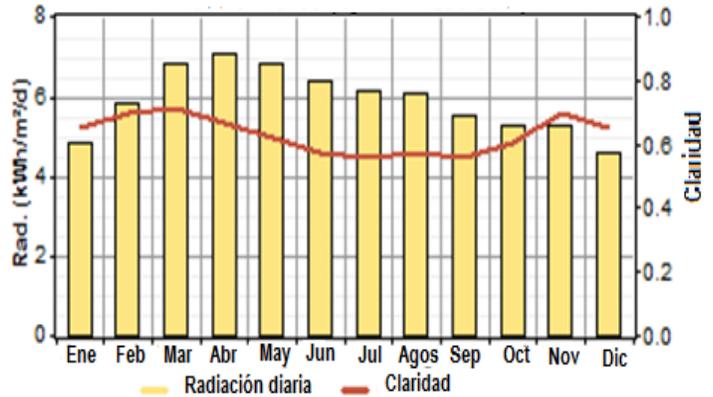


En el Esquema 6 se presenta una gráfica de la radiación media mensual durante un periodo de un año, en la cual se analiza y se tiene una referencia de la cantidad de energía producida por el panel durante ese tiempo. Los datos de latitud y longitud de la ciudad de Querétaro se ingresaron al programa (latitud: 20 grados 36 minutos Norte, longitud: 100 grados 24 minutos Oeste y el promedio de radiación anual: 5.88 kWh/m<sup>2</sup>/día/año) HOMER, con los cuales se obtuvo el promedio de radiación anual, el cual utilizamos para los cálculos posteriores de la energía instalada. En la Tabla No. 7 se muestra la radiación así como la claridad en cada mes.

Tabla No. 7. Radiación solar promedio anual.

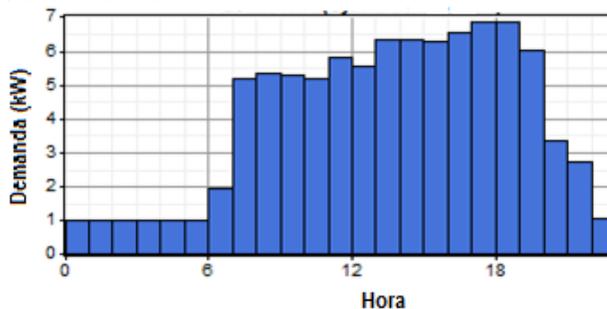
Mes	Claridad	Radiación (kWh/m <sup>2</sup> /día)
Enero	0.654	4.840
Febrero	0.697	5.860
Marzo	0.710	6.810
Abril	0.670	7.040
Mayo	0.623	6.810
Junio	0.577	6.360
Julio	0.562	6.140
Agosto	0.571	6.060
Septiembre	0.556	5.490
Octubre	0.606	5.290
Noviembre	0.696	5.290
Diciembre	0.649	4.580

Esquema 6. Gráfica de la radiación solar incidente utilizada en la simulación.

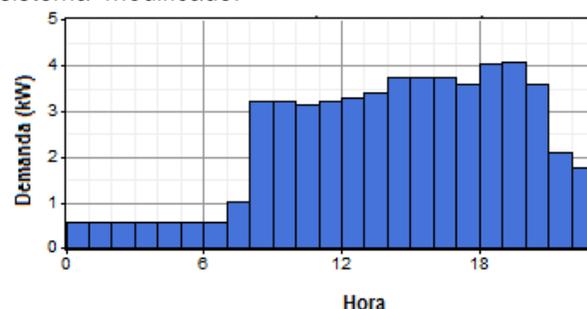


En el programa HOMER se realizó un análisis sobre la demanda de kW durante un año y según la hora del día tanto del sistema inicial así como del sistema modificado de luminarias. En el Esquema 7 se muestra una gráfica con los resultados y la variación de la demanda (kW) según la hora del día, así como la carga máxima de demanda y el consumo total. El resultado que muestra es un consumo anual total de 95.4 kWh/día con una carga máxima de 12 kW. En el Esquema 8 se muestra la gráfica de la demanda de energía con el sistema modificado en la cual se puede apreciar un decremento en la demanda de energía ya que el consumo total marcado es de 55.4 kWh/día con una carga máxima de 5.90 kW, obteniendo un ahorro de 40 kWh/día.

Esquema 7. Gráfica de consumo de kW con el sistema anterior.



Esquema 8. Gráfica de consumo de kW con el sistema modificado.



### 3.5. ANÁLISIS DE COSTOS DEL SISTEMA FV

## 4. RESULTADOS.

Se observó que el sistema previamente implementado tenía un consumo 95.4 kWh/día con una carga máxima de 12 kW, uno de los resultados importantes de este trabajo es el estudio previo que

se realizó al sistema de iluminación, ya que éste indicó el camino a seguir. La Tabla No. 4 presenta un ahorro en el consumo de kWh mientras que la Tabla No. 5 y 6 presentan los valores en luxes después implementar el nuevo arreglo del sistema de iluminación, además los valores presentados se encuentran dentro de los límites que establece la norma de iluminación NOM025-STPS-2008. Por otro lado, en el Esquema 8 se presenta el consumo de potencia del sistema modificado con un 55.4 kWh/día y se nota claramente un ahorro de 40 kWh/día. También, se presenta el cálculo propuesto realizado para la implementación de un sistema de paneles fotovoltaicos interconectados a la red equivalente al 25 % de la energía, del cual se obtiene un total de 20 paneles de 150W de potencia, con un voltaje nominal de 18V de corriente directa, y una corriente nominal de 8.34A, la potencia total instalada es de 3000W.

## 5. CONCLUSIONES.

El trabajo presenta un estudio previo del sistema de iluminación del Laboratorio de Automatización de la UAQ, para el ahorro de energía eléctrica, es importante mencionar que con este estudio se ahorran 40 kWh/día lo que se traduce en un ahorro del 42% con respecto al sistema de iluminación inicial. Por otro lado es importante mencionar que todos los resultados se validaron con la norma mexicana NOM025-STPS-2008. Lo anterior valida las modificaciones realizadas al sistema de iluminación del laboratorio.

Por otro lado, se hace una propuesta para la implementación de un sistema de paneles fotovoltaicos que cubrirían un 25% del consumo de electricidad del laboratorio; esto definitivamente se debe ver reflejado en un ahorro económico en el pago de electricidad que consume la FI de la UAQ.

Finalmente este trabajo puede ayudar a otros investigadores del área que tienen como objetivo el mejorar las condiciones de consumo eléctrico en edificios que no fueron diseñados bajo los criterios de confort y ahorro de energía.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] <http://maps.google.es/maps?f=d&hl=es&geocode=6165520686035674501,0.000000,0.000000;2468123883558225373,0.000000,0.000000&saddr=20.591411,-100.412191&daddr=&mra=mi&mrsp=0&sz=18&sll=20.591506,-100.412276&sspn=0.002431,0.005021&ie=UTF8&ll=20.591321,-100.412207&spn=0.002431,0.005021&t=h&z=18&om=1> [consulta: 9 de marzo de 2011]

[2] [http://www.meteonorm.com/media/maps\\_online/gh\\_map\\_northamerica.pdf](http://www.meteonorm.com/media/maps_online/gh_map_northamerica.pdf) [consulta: 9 de marzo de 2011]

[3] [http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc\\_20100906\\_newsrelease\\_pv\\_es.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_20100906_newsrelease_pv_es.pdf) [consulta: 9 de marzo de 2011]

[4] Henríquez, P. B. "Fotovoltaica Manual de Diseño e Instalación de Solar Energy International". Santiago de Chile, p. 42-47.

[5] Muñoz, L.V." Estudio de la calidad y ahorro de Energía Eléctrica en las Instalaciones de los Edificios Bernardo Quintana, Valdez Vallejo, DIMEI y 12 del Instituto de Ingeniería". Tesis (2008). Universidad Nacional Autónoma de México.

[6] Benítez, G. L. "Proyecto de Ahorro de Energía para un salón de clases implementando un control en el sistema de iluminación. Tesis (2009). ESIME, IPN.

[7] <http://www.gstriatum.com/energiasolar/articulosenergia/183-universidad-en-mexico-instala-energia-solar.html> [consulta: 9 de marzo de 2011]

[8] Ornoff, C, et al. "Public Institution Fast Tracking Solar Panel Array Implementation". Sustainable System and technology, 2009. ISSST'09. IEEE International Symposium.

[9] Herbert de León, M. V. "Generación Eléctrica Fotovoltaica en la Facultad de Ingeniería USAC y el estudio del aprovechamiento". Tesis (2008). Universidad de San Carlos Guatemala.

[10] <http://www.monash.edu.au/news/newsline/story> [consulta: 9 de marzo de 2011]

[11] [http://www.transparencia.uam.mx/inforganos/izt/2009/informe09omh\\_lztapalapa.pdf](http://www.transparencia.uam.mx/inforganos/izt/2009/informe09omh_lztapalapa.pdf) [consulta: 11 de marzo de 2011]

[12] <http://www.uam.mx/comunicacionuniversitaria/boletines/indice/oct-5-09b.html> [consulta: 11 de marzo de 2011]

[13] [http://www.peminet.net/electroiluminacion/magg/magg\\_rc\\_lin\\_sobre2.pdf](http://www.peminet.net/electroiluminacion/magg/magg_rc_lin_sobre2.pdf) [consulta: 7 de marzo de 2011]

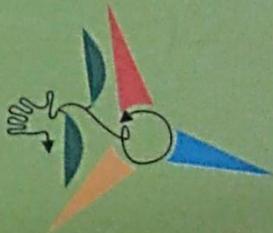
[14] <http://www.chinasampo.cn/Lux-meter/LX1010BS.htm> [consulta: 9 de marzo de 2011]

# CIER 2011

VII Conferencia Internacional de Energía Renovable,  
Ahorro de Energía y Educación Energética

7<sup>th</sup> International Conference for Renewable Energy,  
Energy Saving and Energy Education

1-3 junio 2011 / June 1<sup>st</sup> to 3<sup>rd</sup>, 2011  
Palacio de Convenciones de La Habana / Havana International Conference Center  
Cuba



## CERTIFICADO / CERTIFICATE

Se otorga a / It is given to:

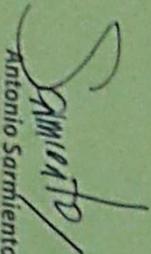
**JULIA MARCELA MARTÍNEZ ROBLES**

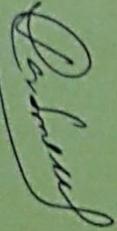
Título / Title:

**Ahorro de energía basado en el estudio de iluminación de un laboratorio escolar.**

- Conferencia magistral / Master Lecture
- Conferencia especial / Special Lecture

- Presentación oral / Oral Presentation
- Carteles / Poster

  
**Antonio Sarmiento**  
Presidente Comité Científico  
CIER 2011

  
**Dra. Yanía Carbonell Morales**  
Presidenta Comité Organizador  
CIER 2011