

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON  
TECNOLOGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

FABIÁN CAMILO CALA GONZÁLEZ

CARLOS ANIBAL RODRIGUEZ SAÑUDO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRONICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2010

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON  
TECNOLOGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

FABIÁN CAMILO CALA GONZÁLEZ

CARLOS ANIBAL RODRIGUEZ SAÑUDO

Trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingenieros Electricistas.

Director Del Proyecto

Ph.D GERARDO LATORRE BAYONA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRONICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2010

## AGRADECIMIENTOS

**El autor expresa sus agradecimientos a:**

**Al profesor Gerardo Latorre Bayona, por su dedicación a la ejecución del proyecto.**

**Al Estudiante de Doctorado Manuel José Ortiz Rangel, por sus oportunos consejos y constante orientación en el desarrollo del proyecto.**

**Al estudiante de Maestría Germán Osma por los consejos y revisiones al trabajo realizado.**

**A nuestros familiares, Madres, Padres, Hermanos, amigos y demás personas que hicieron posible con su confianza y consejos cumplir con éxito la labor realizada.**

**A Nathaly F. Duarte por su constante apoyo.**

*A Dios, a mis padres, hermanos,  
familiares y amigos que han hecho posible este logro.  
Fabián Camilo Cala González*

*A mi mamá*  
*A mi papá*  
*A mi gente*  
*Carlos Anibal Rodríguez Sañudo*

## Tabla de contenido.

INTRODUCCIÓN.....	1
1. GENERALIDADES.....	5
1.1. OBJETIVOS.....	5
1.2. MARCO TEÓRICO.....	5
1.2.1. ENERGÍA SOLAR .....	5
1.2.2. RADIACIÓN SOLAR.....	6
1.2.3. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	9
1.2.4. INVERSORES.....	12
2. CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA.....	14
2.1. POTENCIA INSTALADA.....	14
2.2. AFORO DE CARGA.....	15
3. CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN.....	16
3.1. HORAS PICO SOL BUCARAMANGA.....	16
3.2. INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN DE LOS MÓDULOS SOLARES.....	17
4. DISEÑO.....	20
4.1. SELECCIÓN DEL PANEL.....	20
4.1.1. PROCESO DE SELECCIÓN DEL PANEL.....	21
4.1.2. BASE DE DATOS.....	21
4.1.3. TABLA DE DISEÑO.....	22
4.1.4. CROQUIS DEL DISEÑO.....	25
4.1.5. TABLA DE COSTO Y POTENCIA.....	26
4.2. SELECCIÓN DEL INVERSOR.....	28
4.3. CONEXIÓN DE LOS PANELES.....	29

4.4.	EFFECTO EN LA RED DE LA CONEXIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	30
4.5.	CÁLCULO DEL BANCO CONDENSADORES.....	33
4.6.	BOSQUEJO DE DE LA CONEXIÓN.....	34
4.7.	SELECCIÓN DE LOS CONDUCTORES.....	34
4.7.1.	CÁLCULO DEL CONDUCTOR DE LA FUENTE FOTOVOLTAICA Y SALIDA FOTOVOLTAICA.....	35
4.7.2.	CÁLCULO DEL CONDUCTOR DE SALIDA DEL INVERSOR.....	37
4.7.3.	CÁLCULO DE DUCTOS DE LOS CONDUCTORES.....	37
4.8.	CÁLCULO DE PROTECCIONES.....	38
5.	ANÁLISIS FINANCIERO DEL PROYECTO.....	39
5.1.	INVERSIÓN INICIAL.....	39
5.2.	INVERSIONES POSTERIORES.....	41
5.3.	ESTIMACIÓN DE LOS INGRESOS.....	42
5.3.1.	CUANTIFICACIÓN DE LA ENERGÍA GENERADA.....	43
5.3.2.	PRECIO DE LA ENERGÍA.....	45
5.4.	ESTUDIO FINANCIERO.....	46
	OBSERVACIONES.....	50
	RECOMENDACIONES.....	51
	CONCLUSIONES.....	52
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	54
	ANEXOS.....	56

## LISTA DE TABLAS.

Tabla 1.1: Visión global de la tecnología de las células solares.....	12
Tabla 2.1 Potencia instalada del edificio Eléctrica repotenciado.....	14
Tabla 2.2.A Consumo semanal por tomas del edificio Eléctrica repotenciado.....	15
Tabla 2.2.B Consumo semanal iluminación del edificio Eléctrica repotenciado....	15
Tabla 3.1.A Horas Pico Sol Bucaramanga - Estación Centro.....	16
Tabla 3.1.B Horas Pico Sol Bucaramanga - Estación Centro.....	17
Tabla 4.1 Base de datos de los paneles.....	22
Tabla 4.2 Resultado tabla de diseño.....	24
Tabla 4.3 Costo y Potencia paneles.....	27
Tabla 4.4 Selección del inversor.....	28
Tabla 4.5 Diámetro ductos de los conductores.....	38
Tabla 5.1 Inversión inicial.....	41
Tabla 5.2 Potencia pico de generación y energía útil generada durante 25 años.	44
Tabla 5.3 Tarifa energía UIS.....	45
Tabla 5.4 Valor presente de las inversiones.....	47
Tabla 5.5.A Valor presente de los ingresos caso1.....	47
Tabla 5.5.B Valor presente de los ingresos caso2.....	47
Tabla 5.5.C Valor presente de los ingresos caso3.....	48
Tabla 5.6 Emisión de CO2 de plantas térmicas.....	49
Tabla A.1 Angulo cenital al medio día solar.....	59

## LISTAS DE FIGURAS.

Figura 0.1 Evolución del consumo de energía final en el mundo.....	2
Figura 1.1 Superficie hipotética de radio $ds-t$ .....	6
Figura 1.2 Distribución de la densidad de potencia solar.....	9
Figura 1.3 Intensidad de radiación versus Longitud de Onda.....	9
Figura 3.1 Incidencia de los rayos solares en el ecuador.....	18
Figura 3.2 Incidencia de los rayos solares a latitud 7,13.....	18
Figura 4.1 Vista superior y lateral del panel espaciado entre bloques.....	24
Figura 4.2 Terraza del edificio del E3T, espaciado entre bloques.....	26
Figura 4.3 Modelo básico de conexión trifásica.....	30
Figura 4.4.A Grafica de comportamiento de la potencia de dimensionamiento, reactiva y factor de potencia de la red.....	31
Figura 4.4.B Grafica de comportamiento de la potencia de dimensionamiento, reactiva y factor de potencia de la red.....	32
Figura 4.5 Bosquejo de conexión del diseño a la red.....	34
Figura 5.1 Capacidad de Generación del sistema fotovoltaico en el tiempo de vida útil. ....	43
Figura A.1 Movimiento de traslación de la tierra alrededor del sol.....	57
Figura A.2 Inclinación del eje de rotación de la tierra.....	57
Figura A.3 Angulo de incidencia de los rayos solares en el ecuador en época de solsticios.....	58
Figura A.4 Angulo de incidencia de los rayos solares en el ecuador en época de equinoccios.....	58
Figura B.1 Angulo altura solar $H$ , y ángulo Cenital $\theta_z$ .....	61
Figura B.2 Angulo Acimut o Acimutal $A$ .....	61
Figura C.1 Proyección de sombras.....	63
Figura D.1 Conexión Fase –Neutro, Conexión Fase – Fase.....	64
Figura D.2 Potencia fase a, conexión Fase –Neutro.....	65
Figura D.3 Potencia fase a, fase b, conexión Fase –Fase.....	66

Figura D.4 Grafica de las potencia de dimensionamiento y factor de potencia modelo IEEE 1459.....67

**LISTAS DE ANEXOS.**

ANEXO A. MOVIMIENTO RELATIVO SOL-TIERRA.....56  
ANEXO B. POSICIÓN SOLAR.....61  
ANEXO C. CÁLCULO DE SOMBRAS.....63  
ANEXO D. EFECTOS EN LA RED POR GENERACIÓN DESBALANCEADA...64  
ANEXO F. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS.....68

**TÍTULO:** DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON TECNOLOGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.<sup>1</sup>

**AUTORES:** FABIÁN CAMILO CALA GONZÁLEZ.  
CARLOS ANÍBAL RODRÍGUEZ SAÑUDO.<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** Solar, fotovoltaica, energía renovable, energía limpias, diseño.

**DESCRIPCIÓN:**

El agotamiento y contaminación de las energías convencionales ha hecho que la sociedad busque nuevas alternativas energéticas, inclinándose siempre hacia el desarrollo y uso de las energías limpias y renovables (Solar, Eólica, Biomasa, Biogás, etc) ya que estas generan poca contaminación con respecto a las tradicionales y se cuenta con gran recurso. Entre estas energías está la tecnología solar fotovoltaica. La universidad industrial de Santander, en especial la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, tiene como propósito ser pionera en el uso e investigación de las energías limpias. Por esto, el edificio de la escuela se encuentra en un proceso de repotenciación y entre los objetivos se tiene el uso de la tecnología solar fotovoltaica.

En este trabajo se presenta el potencial solar en la ciudad de Bucaramanga y el aforo de carga del edificio Eléctrica. A partir de esta información se propone un diseño de ingeniería básica de generación fotovoltaica; diseño basado en normas, criterios y parámetros explicados a lo largo del documento.

Se estudió la viabilidad financiera del diseño, mostrando como obstáculo el alto costo de la tecnología fotovoltaica. Países como España, que tienen políticas gubernamentales de incentivar las energías renovables, son pioneros en el ejercicio de la fotovoltaica.

---

<sup>1</sup> Proyecto de Grado: Trabajo de Investigación.

<sup>2</sup> Facultad de Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ph. D. Gerardo Latorre Bayona.

**TITLE:** DESIGN OF AN ELECTRIC ENERGY SUPPLY SYSTEM WITH SOLAR PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGY.<sup>1</sup>

**AUTHORS:** FABIÁN CAMILO CALA GONZÁLEZ.  
CARLOS ANÍBAL RODRÍGUEZ SAÑUDO.<sup>2</sup>

**KEYWORDS:** Solar, photovoltaic, renewable energy, clean energies, design.

**DESCRIPTION:**

The exhaustion and contamination of the conventional energies have brought a change of the development and use of the clean and renewable energies (solar energy, wind energy, biogas energy and biomass energy). These kinds of energies are used because they generate low contamination compared with traditional energies. Besides, there are a lot of resources for the production of these energies. Photovoltaic energy belongs to those energies. The Industrial University of Santander and especially the Electric, Electronic Engineer and Telecommunications School has the purpose of being pioneer in the use and investigation of clean energies. For this reason, The E3T building is currently in a revamp process. One of the objectives of this is the implementation of photovoltaic solar technology.

In this paper is shown the solar potential in the city of Bucaramanga, also is shown the charge capacity. This work proposes a design based on basic engineering of photovoltaic generation. This design is based in norms, criterions and parameters which are explain in the paper.

The financial viability of the project was studied. This showed that the cost of the photovoltaic energy is a big obstacle. In some countries like Spain there are politics which have the objective of giving incentives to renewable energies. These countries are pioneers in the photovoltaic exercise.

---

<sup>1</sup> Degree Project: Research paper.

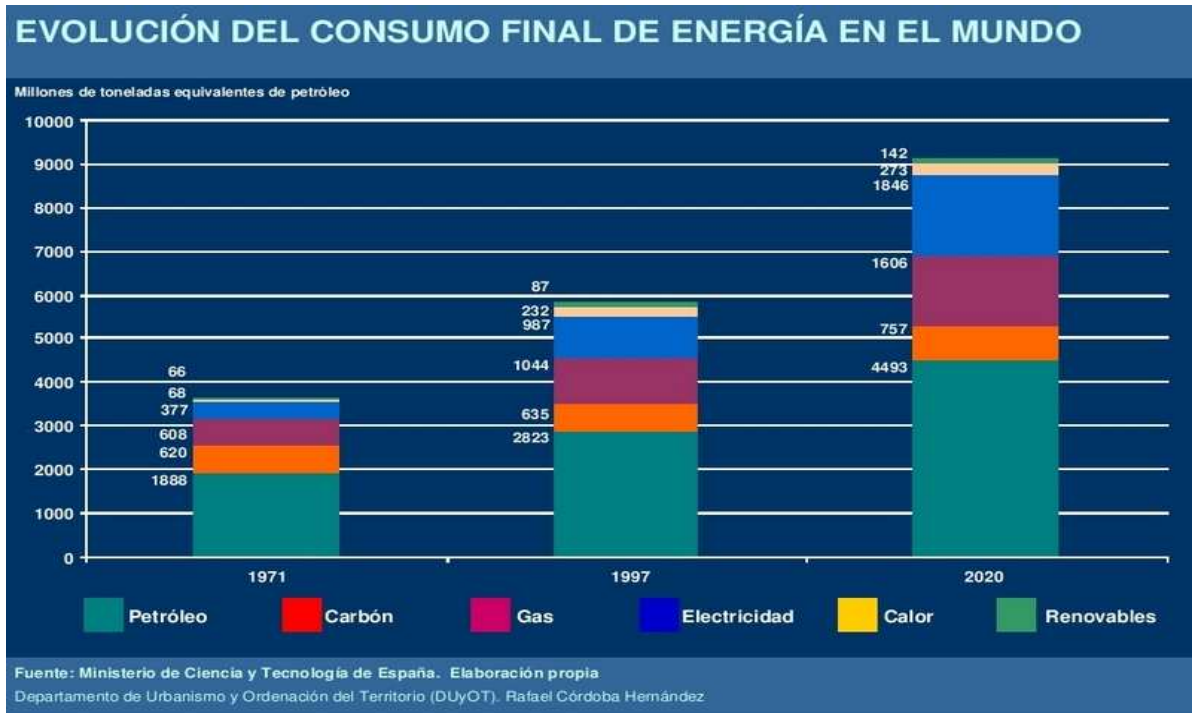
<sup>2</sup> Faculty of Physic – Mechanics Engineering. Electric, Electronic and Telecommunication engineering faculty.  
Director: Ph D. Gerardo Latorre Bayona.

## INTRODUCCIÓN.

A lo largo de la historia se evidencia que el desarrollo social, político y económico de un país está estrechamente ligado al consumo energético del mismo. El continuo desarrollo mundial ha traído consigo un aumento acelerado de la demanda de energía que en una mayor parte se obtienen de los combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón. La velocidad de crecimiento de las tecnologías para la consecución de los combustibles fósiles y la velocidad de consecución misma de reservas, son menores que la velocidad de crecimiento de la demanda de energía mundial, lo que hace vislumbrar una recesión energética.

Por esto, la humanidad requiere una solución, aclama por su seguridad y supervivencia. Las ERLI (energías renovables limpias) han sido llamadas a formar parte de la revolución y toman una importancia cada vez más significativa en la medida en que se acerca la recesión energética y los problemas medioambientales se agudizan. La energía que se utiliza proviene del Sol y por medio de transformaciones naturales (fotosíntesis, biomasa, carbón, petróleo, etc.) y calentamiento de materia (aire (vientos), agua (olas), etc.) es posible aprovecharla para el consumo.

La energía eléctrica es una de las formas de energía más utilizada en el mundo (Figura 0.1), ya que es más eficiente que las demás a la hora del transporte, el control y la comercialización.



**Figura 0.1** Evolución del consumo de energía final en el mundo.  
Fuente: Ministerio de Ciencia y Tecnología de España.

La integración de las ideas anteriores le da a la Energía Solar fotovoltaica su importancia, ya que en ella convergen características tan importantes como la utilización directa de la energía solar para obtener energía eléctrica, teniendo en cuenta que es una de las principales formas de consumo final de energía de la sociedad. Maximiza su importancia el hecho de no emitir gases nocivos para el planeta, lo cual la hace amigable con el medio ambiente y a su vez ayuda a satisfacer la demanda energética existente.

En el proyecto se hará el diseño de una estación de generación de energía eléctrica, a partir de la tecnología solar fotovoltaica, para el edificio Eléctrica repotenciado de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E<sup>3</sup>T); como ejemplo de utilización de las nuevas tecnologías de generación de energías limpias.

La meta del diseño es la generación de energía eléctrica a partir de la tecnología solar fotovoltaica, con conexión a la red. El diseño se dividirá en cuatro etapas. En las cuales se explica cuales fueron los criterios y parámetros de diseño:

Caracterización de la carga.

Potencial preliminar de generación.

Diseño preliminar.

Presupuesto e inversión inicial.

### **Caracterización de la carga.**

Se centra en el comportamiento del consumo de energía del edificio Eléctrica, en dos etapas diferentes:

- Potencia instalada.
- Aforo de carga (Consumo semanal de energía).

La caracterización de la carga se realizará para cuantificar la expectativa de generación. Vale decir que esta etapa no es importante al momento de saber que la generación es baja con respecto a la carga. No obstante, si la generación es relativamente alta, se debe tener cuidado de cómo se afecta la red, ya que esto puede traer efectos no deseados, como se verá en capítulos posteriores.

### **Potencial preliminar de generación.**

Se realizará un análisis de las Horas Sol Pico promedio para cada mes del año, durante un periodo de 8 años, en la zona de Bucaramanga y el cálculo del ángulo de inclinación de los paneles para una mayor eficiencia.

### **Diseño preliminar.**

Comprende los criterios y parámetros de selección del panel, inversor, banco de condensadores, protecciones y cables.

### **Presupuesto e inversión inicial.**

Se realizará el presupuesto, costo total y viabilidad del diseño, cuantificando la generación de energía en los años de vida de los elementos de diseño dados por el fabricante.

## **1. GENERALIDADES.**

### **1.1. OBJETIVOS.**

#### **Objetivo general.**

Diseñar un sistema de suministro de energía eléctrica con tecnología solar Fotovoltaica para el edificio Eléctrica de la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E<sup>3</sup>T).

#### **Objetivos específicos.**

- Elaborar un documento síntesis del estado del arte en cuanto a generación de energía Solar Fotovoltaica.
- Caracterizar el consumo diario de energía eléctrica del edificio Eléctrica.
- Determinar el potencial de energía solar en la terraza del edificio Eléctrica.
- Dimensionar el sistema, con base en la generación y las normas vigentes colombianas.
- Realizar la ingeniería básica del proyecto: planos topológicos, diagramas unifilares y especificaciones técnicas generales del diseño.
- Realizar el presupuesto de inversión del Proyecto.

### **1.2. MARCO TEÓRICO.**

#### **1.2.1. ENERGÍA SOLAR**

El Sol es la fuente de la energía existente sobre la Tierra. De él se abastecen de energía las plantas, los animales y en general los ecosistemas. El Sol es la causa de los flujos atmosféricos y el origen del calor que hace posible la vida. Nada existiría sin él, en la órbita terrestre.

La energía del Sol se libera debido a fusiones termonucleares ocurridas en el núcleo, en la cual el Hidrogeno se transforma en Helio [1]. En este proceso se libera una masa aproximada de 4,4 millones de toneladas cada segundo [1], que llega a la órbita de la Tierra en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material, a la velocidad de la luz. Haciendo una relación con la ecuación de Einstein ( $E = mc^2$ ) la potencia emitida por el Sol cada segundo aproximadamente es  $P_{sol} = 3,9 \cdot 10^{26}$  [W].

### 1.2.2. RADIACIÓN SOLAR.

Para calcular la intensidad de radiación que llega a la Tierra proveniente del Sol, se genera una superficie esférica hipotética con centro en el Sol y radio igual a la distancia Sol-Tierra ( $d_{s-t} = 1,496 \cdot 10^{11}$  [m]), llamada Unidad Astronómica [UA], [1], (ver figura 1.1). Se supone entonces que la potencia emitida por el Sol se reparte uniformemente a lo largo de esta superficie.

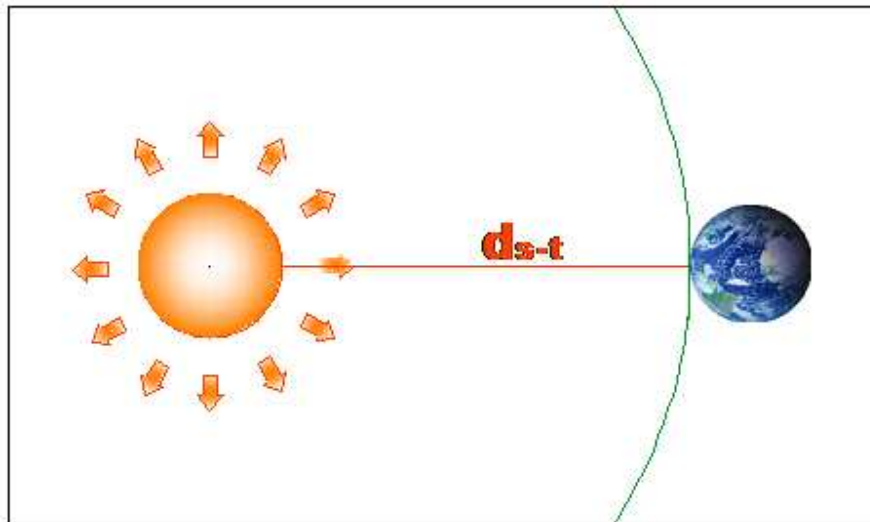


Figura 1.1 Superficie hipotética de radio  $d_{s-t}$ .

La ecuación que describe la intensidad de radiación Solar extraterrestre es:

$$I = \frac{P_{sol}}{S} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1.1)$$

$P$  es la potencia emitida por el Sol,  $P_{sol} = 3,9 \cdot 10^{26}$  [W].

$S$  es la superficie de la esfera hipotética  $S = 4\pi R^2$ ;  $R = 1,496 * 10^{11} [m]$

$I$  es la intensidad de la radiación Solar extraterrestre.

$$I \cong \frac{3,9*10^{26}}{4\pi(1,496*10^{11})^2} \quad (1.2)$$

Al tomar los valores exactos, tanto de la velocidad de la luz, cantidad de materia liberada por el Sol, potencia emitida por el Sol y distancia Tierra-Sol se obtiene el valor de la radiación solar extraterrestre, también llamada Constante Solar [2].

$$I = 1\ 366 [W/m^2] \quad (1.3)$$

Este valor coincide con la intensidad de la radiación solar medida por medio de satélites artificiales en el espacio vacío, justamente por encima de la atmósfera que rodea al planeta.

La intensidad extraterrestre de potencia varía entre  $1\ 366 \pm 4\ %[W/m^2]$  [3]. Ésta potencia se debilita en la superficie de la tierra debido a varias razones, entre ellas:

- El vapor de agua y otros gases en la atmósfera terrestre absorben parte de esta energía.
- La distancia de la Tierra al Sol (ver anexo A), que depende del ángulo de proyección de los rayos solares.
- La reflexión y dispersión de los rayos solares.

Se puede entonces utilizar un modelo aproximado para calcular la densidad de potencia en la superficie terrestre, teniendo en cuenta las restricciones de paso de radiación anteriormente descritas. La ecuación que describe la densidad de potencia es [3]:

$$\rho = \rho_o \cos \theta_z (\alpha_{dt} - \beta_{wa}) \alpha_p \quad (1.4)$$

Donde:

$\rho$  : densidad de potencia en la superficie de la Tierra por metro cuadrado.

$\rho_o$  : Densidad de potencia extraterrestre 1,366 [ $k W/m^2$ ].

$\theta_z$  : ángulo Cenit (es el ángulo formado entre la línea perpendicular a la superficie de la Tierra y el rayo de Sol que llega en una época determinada).

$\alpha_{dt}$  : transmitancia directa de los gases excepto por el vapor de agua.

$\beta_{wa}$  : absorción de la radiación debida al vapor de agua.

$\alpha_p$  : transmitancia del aerosol.

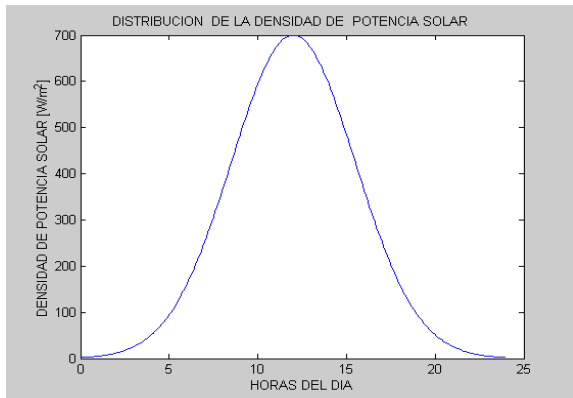
Aerosol hace referencia a las partículas suspendidas en la atmósfera terrestre (sulfatos, compuestos orgánicos volátiles, carbón, etc.) el tamaño de estas partículas varía desde  $10^{-3}$  hasta  $10^3 [\mu m]$ .

Se define la eficiencia solar en la superficie terrestre como [3]:

$$\eta_s = \frac{\rho}{\rho_o} = \cos \theta_z (\alpha_{dt} - \beta_{wa}) \alpha_p \quad (1.5)$$

Se puede observar que la potencia solar en la superficie terrestre es tan sólo una fracción de la potencia extraterrestre sobre la superficie de la atmósfera. Esta eficiencia solar varía de un lugar a otro, debido la época del año (estaciones), la hora del día y de la contaminación de la zona de incidencia de los rayos solares.

La densidad de potencia solar varía con el ángulo Cenit y el Cenit varía dependiendo de la hora del día. En un día típico con condiciones climatológicas estables, la densidad de radiación solar diaria sigue la forma de curva de campana, como se muestra en la figura 1.2.



La densidad de potencia solar se describe por la ecuación [3]:

$$\rho = \rho_{max} e^{-(t-t_0)^2/2\sigma^2}$$

$\rho_{max}$  = Potencia Máxima, ej. 700 W

$t_0$  = 12 horas

$\sigma$  = 3.5 horas. (Desviación estándar)

Figura 1.2 Distribución de la densidad de potencia solar, Día típico: condiciones de clima estables.

La energía solar llega a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda. Esto hace necesario conocer la distribución de la intensidad de radiación versus la longitud de onda (figura 1.3), con el fin de realizar un análisis de los materiales que se emplean en la construcción de módulos solares y mejorar la eficiencia en la transformación de energía solar a energía eléctrica; aprovechando en principio la captura de ondas de la franja en donde la intensidad de radiación solar sea más alta y posteriormente capturar las restantes.

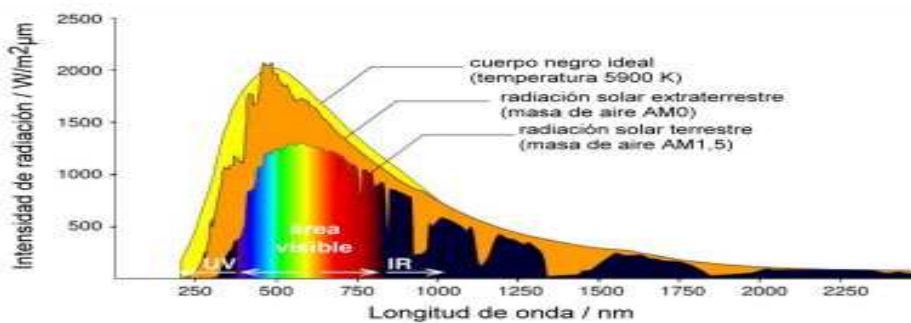


Figura 1.3 Intensidad de radiación versus Longitud de Onda.  
Fuente: Atmospheric Chemistry Department

### 1.2.3. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.

La energía solar fotovoltaica se basa en la captación de energía del Sol y su transformación en energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas. Los materiales semiconductores, utilizados en la elaboración de celdas fotovoltaicas,

deben ser producidos con purezas muy altas; normalmente con estructura cristalina. La conversión de la energía solar a eléctrica se realiza de manera limpia, directa y elegante. Existen dos elementos que sustentan la utilización de la energía Fotovoltaica: "La necesidad de proteger el medio ambiente y la necesidad de crecer económicamente".

### **1.2.3.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.**

La conversión fotovoltaica se basa en el efecto fotoeléctrico. Esto es, en la conversión de la energía lumínica proveniente del Sol en energía eléctrica. Consiste en la captación de la energía radiante procedente del Sol, transmitida por el espacio en forma de fotones de luz, hasta la superficie de la célula. Cuando los fotones de un determinado rango de energía chocan con átomos de ciertos materiales semiconductores (el Silicio es el más representativo) les ceden su energía, produciendo un desplazamiento de electrones que es en definitiva una corriente eléctrica. Estos fotones se caracterizan por su energía y su longitud de onda (que forman lo que se llama espectro solar). Sólo una parte de este espectro (que depende del material semiconductor) es aprovechada para el desplazamiento de los electrones. Los materiales semiconductores para su utilización en celdas fotovoltaicas, han de ser producidos en purezas muy altas, normalmente con estructura cristalina. Estos cristales se cortan en rebanadas muy finas (del orden de micras) y se dopan unas con elementos químicos, para producir huecos atómicos, lado "p", (en el caso del Si con Boro) y otras con otros elementos para producir electrones móviles, lado "n" (con Fósforo también en el caso del Si). La unión de una rebanada "n" con una rebanada "p" (ambas son transparentes y por tanto dejan pasar los fotones) cada una con un conductor eléctrico metálico, forma una célula fotoeléctrica, la cual bajo la incidencia de fotones, crea una corriente de electrones. Corriente eléctrica continua a través del circuito eléctrico al que estén conectados los dos conductores de la celda.

### 1.2.3.2. TECNOLOGÍAS ACTUALES.

En la actualidad se cuenta con diferentes tecnologías para la conversión de la energía solar a energía eléctrica. Entre ellas los módulos de cristales de Silicio y las láminas delgadas.

Los módulos de cristales de silicio son de dos tipos, monocristalinos y policristalinos. El tipo monocristalino requiere un cuidadoso proceso de fabricación y demanda enormes cantidades de energía en su elaboración. Esto incrementa el costo de producción del módulo, pero genera una mayor eficiencia en la conversión. El tipo policristalino requiere un proceso de fabricación menos complejo, lo cual conlleva a una reducción de los costos de fabricación y a su vez una menor eficiencia que los de tipo monocristalino. Otra ventaja que tienen los módulos cristalinos es que son más robustos a las condiciones del medio, en cuanto a contaminación que los de Silicio amorfo.

Los módulos de Silicio Amorfo (lámina delgada) son una alternativa tentadora debido a los costos de producción menores que los de Silicio cristalino, para la misma potencia instalada, alrededor del 30 % [4]. Sin embargo, la degradación del material de la lámina delgada produce una pérdida de generación de potencia nominal en un año del orden del 20 % al 30 % [5], y una reducción de la eficiencia nominal en tan sólo días [6]. Además, para la instalación de una potencia determinada, ocupan del 200 % al 250 % del espacio ocupado por los módulos monocristalinos [4] y son más sensibles a la pérdida de generación por contaminación.

Las módulos de láminas delgadas de CIGS (Cobre, Indio, Galio y Selenio), Arseniuro de galio (GaAs) y telurio de cadmio (CdTe), son poco comerciales y en Colombia su distribución es casi nula. En el caso del GaAs, éste alcanza rendimientos del 17 %; muy ventajoso al tratarse de lámina delgada, pero no son tecnologías muy comerciales debido a los complejos procesos de fabricación.

En la tabla 1.1, visión global de la tecnología de las células solares [7], se muestra un resumen comparativo entre las diferentes tecnologías utilizadas hoy en día; indicando su rendimiento en laboratorio y muestras de paneles en una producción en serie.

**Tabla 1.1:** Visión global de la tecnología de las células solares.

Tecnología	Rendimiento		Estatus	Comentario
	Laboratorio	Serie		
Silicio Monocristalino	24%	13- 18%	Producción industrial	Aplicación de potencia acreditada
Silicio Policristalino	18%	12- 16%		
Silicio Amorfo	12%	8%		
GaAs	25%	17%	Series reducidas	Potencia poco estable
Telurio de Cadmio	16%	9%	Producción piloto	Solo en la astronáutica
CIS	18%	11%	Producción piloto	Gran potencial de reducción de costos

Fuente: Universidad de Cataluña, curso fuentes de energía renovable febrero 2005.

#### 1.2.4. INVERSORES.

Son dispositivos capaces de convertir corriente continua en corriente alterna. Para ello emplean un circuito electrónico de transistores y tiristores que corta muchas veces cada segundo la corriente continua que recibe, produciendo una serie de impulsos alternativos que simula las características de la corriente alterna [8].

Los inversores trifásicos se implementan con un circuito puente trifásico. Se compone de 6 elementos de potencia que ofician como interruptores, operando en corte y saturación con una secuencia apropiada, cuyas señales provienen del circuito de control. Los 6 diodos en conexión inversa a cada elemento, son para conducir la corriente reactiva de retorno a la fuente de tensión  $E$ . Si el inversor opera con fuente de corriente  $I$ , los diodos no son necesarios. Estos inversores, además de dividirse en dos grupos, de acuerdo con la fuente de alimentación,  $E$  ó  $I$ , pueden subdividirse por su forma de operar: conducción a  $180^\circ$  de cada elemento, con lo cual habrá 3 elementos en conducción al mismo tiempo y

conducción a 120°, con 2 elementos por vez. Además, pueden alimentar los dos tipos característicos de cargas trifásicas simétricas: conexión triángulo y estrella [9].

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA.

La caracterización de la carga se realizará para cuantificar la expectativa de generación.

### 2.1. POTENCIA INSTALADA.

Se hace el cálculo de la potencia instalada de acuerdo a las especificaciones dadas en el diseño de la repotenciación y las necesidades especiales de energía de cada espacio del edificio.

**Tabla 2.1** Potencia instalada del edificio Eléctrica repotenciado.

Nivel	Espacio	Cantidad	# tomas	# luces	Potencia por punto [VA]	Potencia espacio unitario [kVA]	Potencia total [kVA]
1	Salón especial	2	44	3	180	8,46	16,92
	Profesores	5	4	2	180	1,08	5,4
	Oficina E.3.T.	1	26	26	180	9,36	9,36
	Baño	1	1	1	180	0,36	0,36
	Pasillo	1	3	8	180	1,98	1,98
2	Salón especial	1	44	3	180	8,46	8,46
	Salón normal	3	4	3	180	1,26	3,78
	C.I.E.E.	1	18	12	180	5,4	5,4
	Oficina C.I.E.E.	1	5	2	180	1,26	1,26
	Baño	1	1	1	180	0,36	0,36
	Pasillo	1	3	8	180	1,98	1,98
3	Salón especial	1	44	3	180	8,46	8,46
	Salón normal	3	4	3	180	1,26	3,78
	I.E.E.E.	1	5	4	180	1,62	1,62
	Baño	1	1	1	180	0,36	0,36
	Pasillo	1	3	8	180	1,98	1,98
4	Salón especial	1	44	3	180	8,46	8,46
	Salón normal	3	4	3	180	1,26	3,78
	Baño	1	1	1	180	0,36	0,36
	Pasillo	1	3	8	180	1,98	1,98
5	Salón especial	1	44	3	180	8,46	8,46
	Salón normal	3	4	3	180	1,26	3,78
	Baño	1	1	1	180	0,36	0,36
	Pasillo	1	3	8	180	1,98	1,98
						Total	100,62

## 2.2. AFORO DE CARGA.

Consideraciones.

- Se realiza un aforo de carga semanal, dada las características de uso del edificio.
- Todos los puntos de iluminación serán de 4 x 17 [W].
- Potencia de consumo promedio por toma 100 [W].

**Tabla 2.2.A** Consumo semanal por tomas del edificio Eléctrica repotenciado.

Espacio	Puntos de Tomas	Potencia Toma [W]	Horas de Utilización [h]	Cantidad	Consumo [kWh]
Salón especial	44	100	20	6	528
Salón normal	4	100	20	12	96
Pasillo	0	0	0	5	0
Baño	1	100	10	5	5
Oficina E.3.T.	26	100	31,92	1	83
C.I.E.E.	18	100	20	1	36
Oficina C.I.E.E.	5	100	28	1	14
I.E.E.E.	5	100	24	1	12
Profesores	4	100	18	5	36
Total [kWh]					810

**Tabla 2.2.B** Consumo semanal iluminación del edificio Eléctrica repotenciado.

Espacio	Puntos de iluminación	Potencia Iluminación [W]	Horas de iluminación [h]	Cantidad	Consumo [kWh]
Salón especial	3	68	15	6	18,36
Salón normal	3	68	15	12	36,72
Pasillo	8	68	20	5	54,4
Baño	1	68	25	5	8,5
Oficina E.3.T.	26	68	40	1	70,72
C.I.E.E.	12	68	50	1	40,8
Oficina C.I.E.E.	2	68	40	1	5,44
I.E.E.E.	2	68	40	1	5,44
Profesores	2	68	20	5	13,6
Total [kWh]					254

Para el edificio Eléctrica repotenciado se espera un consumo semanal de 1,064 [MWh], equivalente a un consumo diario de 212,794 [kWh] o un consumo mensual de 4,256 [MWh].

### 3. CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN.

Para caracterizar el potencial de generación de la terraza del edificio Eléctrica de la UIS, se debe recurrir a mediciones tomadas por organismos especializados en el tema. En Bucaramanga la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), es un organismo competente para realizar las mediciones de radiación solar. La CDMB cuenta con varias estaciones meteorológicas repartidas a lo largo de la ciudad, una de ellas es la estación meteorológica CENTRO, de la cual tiene datos históricos (2001-2008) de radiación solar diaria. Esta estación se encuentra cerca de la UIS, lo que garantiza que las mediciones de radiación tomadas son aplicables en este proyecto.

#### 3.1. HORAS PICO SOL BUCARAMANGA.

Para tabular los resultados obtenidos se introducirá el concepto de Hora Pico Sol (HPS). La HPS es una unidad que mide la radiación solar. Se define como el tiempo en horas de una hipotética radiación solar diaria constante de  $1\,000\ [W/m^2]$ . En la tabla 3.1 A-B se muestran los análisis sintetizados y promediados de las Horas Pico Solar en Bucaramanga, para todos los meses del año entre el 2001 y el 2008.

**Tabla 3.1.A** Horas Pico Sol Bucaramanga - Estación Centro.

Primer semestre						
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
<b>2001</b>	5,251	5,349	5,233	5,859	5,329	5,620
<b>2002</b>	5,464	5,332	5,491	5,162	5,369	4,762
<b>2003</b>	5,171	5,559	5,796	6,565	6,334	5,557
<b>2004</b>	4,860	5,650	5,471	4,617	5,097	5,059
<b>2005</b>	4,534	4,805	6,278	5,169	5,643	4,658
<b>2006</b>	4,938	5,477	5,119	4,898	5,214	4,651
<b>2007</b>	5,505	6,070	5,348	5,534	4,891	4,349
<b>2008</b>	5,224	5,776	5,834	5,386	5,582	4,809
<b>Promedio Mensual</b>	5,118	5,502	5,571	5,399	5,432	4,933

**Tabla 3.1 B** Horas Pico Sol Bucaramanga - Estación Centro.

Segundo semestre						
Año	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
<b>2001</b>	5,774	4,961	5,465	5,156	4,919	4,140
<b>2002</b>	4,996	5,361	5,697	5,542	5,281	4,836
<b>2003</b>	4,765	5,216	5,226	4,759	4,836	4,927
<b>2004</b>	4,691	5,272	5,340	5,170	4,852	4,863
<b>2005</b>	4,917	4,911	4,917	5,312	4,847	4,802
<b>2006</b>	4,372	4,979	5,105	4,862	4,772	4,504
<b>2007</b>	4,798	4,687	5,239	5,236	4,837	4,392
<b>2008</b>	5,023	5,260	5,243	5,084	5,019	4,892
<b>Promedio Mensual</b>	4,917	5,082	5,279	5,140	4,920	4,669

En las tablas se muestra el promedio histórico diario de HPS en los 8 años. En general el promedio anual en Bucaramanga es de 5,164 [HPS]. Información útil cuando se cuantifique la energía de generación del sistema fotovoltaico.

### 3.2. INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN DE LOS MÓDULOS SOLARES.

La instalación del proyecto se va a llevar a cabo en la ciudad de Bucaramanga, ubicada en el globo terrestre a una longitud oeste de 73,13° y latitud norte de 7,13°. Esta ubicación hace que los rayos solares no incidan de la misma manera y con la misma componente perpendicular a la misma hora y en la misma longitud, pero a latitud 0° (ecuador punto A de la figura 3.1).

Para obtener una mayor absorción de energía procedente del Sol se debe inclinar los módulos de forma tal que incidan perpendicularmente la mayor cantidad de rayos solares a lo largo del año; en el ecuador esto se logra dejando el ángulo de inclinación de los módulos igual a cero grados (0°). Si el panel se mueve en la línea del meridiano desde el ecuador hacia el norte, para lograr un mismo efecto, es necesario inclinar los paneles con el propósito de corregir la posición latitudinal. En la mayoría de los casos el ángulo de inclinación es igual a la latitud con el modulo orientado hacia el Sur [10] [11], en los países europeos se suele corregir este ángulo de inclinación debido a que se presentan estaciones con diferencias

de condiciones de radiación muy marcadas [10] [11], pero en la medida en que nos acerquemos al Ecuador esta corrección va perdiendo importancia.

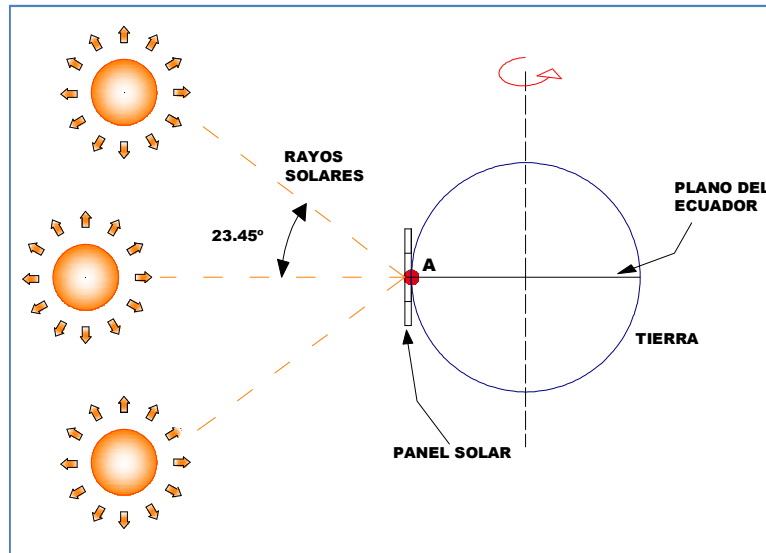


Figura 3.1 Incidencia de los rayos solares en el ecuador.

De la figura 3.1 y 3.2 se observa que el ángulo declinación solar  $\delta$ , varía entre  $-23,45^\circ$  y  $23,45^\circ$ , por lo tanto el ángulo cenital al medio día solar varía entre  $90^\circ \pm 23,45^\circ$  (Ver anexo A y B).

Para Bucaramanga el ángulo de inclinación es aproximadamente  $7,13^\circ$  (latitud). En la figura 3.2 se muestra la inclinación del módulo solar “con respecto al plano del suelo en Bucaramanga” (punto B de la grafica).

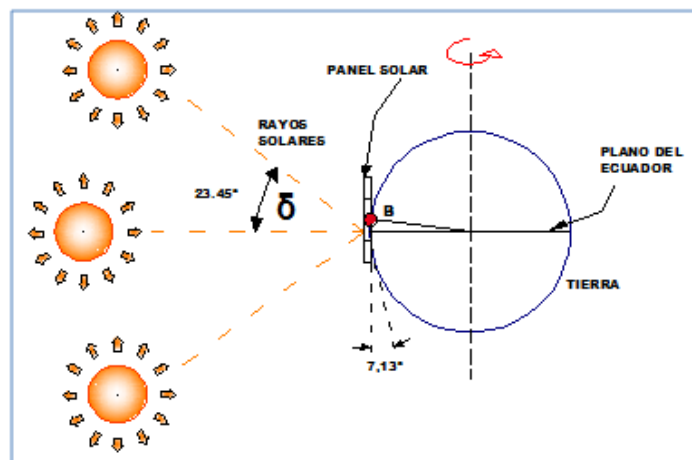


Figura 3.2 Incidencia de los rayos solares a latitud 7,13.

Para resumir, en el diseño se inclinarán los módulos solares **7,13°** con el motivo de mejorar la incidencia de los rayos solares, para lograr una mayor captación y posterior conversión de la energía lumínica en energía eléctrica.

## 4. DISEÑO.

El objetivo del diseño es generar más del 10% de la potencia instalada en el edificio. En consecuencia, la potencia de generación de diseño es de 10-15 [kW].

En este punto se conoce cuáles son los paneles existentes en el mercado y las características necesarias de cada uno de ellos.

### 4.1. SELECCIÓN DEL PANEL.

En la terraza del edificio de ingeniería eléctrica se cuenta con el espacio limitado. No se dispone de personal que esté limpiando continuamente los módulos, para garantizar la generación continua de los amorfos. Tanto la consecución, como la eficiencia, durabilidad y soporte técnico de los módulos cristalinos son mejores que los amorfos. Por tanto, se opta por elegir para el diseño módulos de silicio cristalino.

El proceso de selección del panel se basa en los criterios de economía, potencia máxima y área de utilización. Los parámetros de ayuda a observar del panel son: eléctricos: potencia pico, parámetros longitudinales del panel, precio del watt, término igual a el precio del panel sobre potencia pico o costo total sobre potencia pico instalada de los paneles ( $\$/\text{panel /Wp}$ ).

Antes de hacer el proceso de selección del panel se debe detallar las curvas de variación de la tensión y la corriente en función de la irradiación, además la curva variación de los valores de tensión y corriente en función de la temperatura de los paneles, estas curvas muestran la calidad del panel bajo condiciones anormales, si las curvas reflejan mala calidad del panel, este se extrae del estudio de selección. Los otros parámetros característicos del panel son importantes en el diseño, se tendrán en cuenta más adelante.

#### 4.1.1. PROCESO DE SELECCIÓN DEL PANEL.

Al no encontrar en la literatura un proceso de selección del panel, en el cual se pudiera observar una cuantificación de los parámetros, como son factores económicos, potencia y área de utilización, se desarrolló un proceso en parte iterativo fabricando una tabla de costo y potencia, donde se cuantifica los parámetros de selección prioritarios del panel, basado en los siguientes pasos.

- Base de datos.
- Tabla de diseño.
- Croquis del diseño.
- Tabla de costo y potencia.

#### 4.1.2. BASE DE DATOS.

Es un proceso de investigación de fichas técnicas y costo de los paneles vigentes en el mercado. Es recomendable hacer una tabla de datos con especificaciones técnicas de los paneles para facilitar la búsqueda de datos, ésta tendrá los siguientes ítems:

**Referencia.**

**Marca.**

**Potencia Máxima:** Potencia de conversión eléctrica a una irradiancia de 1000[W].

**Tensión  $U_{mmp}$ :** Tensión del panel al entregar la máxima potencia.

**Corriente  $I_{mmp}$ :** Corriente del panel al entregar la máxima potencia.

**Tensión O.C:** Tensión a circuito abierto.

**Corriente C.C:** Tensión a circuito abierto.

**Precio.**

**Porcentaje de Conversión de la célula:** Porcentaje de eficiencia con respecto de la irradiación solar.

**Años de vida estimados.**

Porcentaje de potencia Porcentaje de potencia que genera al final de los años de vida estimados.

**Años de garantía:** Garantía mínimo de 2 años.

**Tecnología.**

**Tensión máxima:** Tensión máxima de rigidez eléctrica.

**Longitud.**

**Ancho.**

**Alto.**

**Peso.**

**Tabla 4.1** Base de datos de los paneles.

Nº Panel	Referencia	Marca	Potencia Máxima [W]	Tensión U <sub>mp</sub> [V]	Corriente I <sub>mp</sub> [V]	Tensión O.C. [V]	Corriente C.C:	% conversión de la célula
1	AMPA- ASM55	AMPA	55	17,2	2,9	21.6	3,1	16
2	AMPA- ASM80	AMPA	80	17,5	4,85	21,8	4,85	16
3	AMPA- ASM57	AMPA	150	24	4,35	43,2	5,01	17
4	Kyocera SKC65	Kyocera	65	17,4	3,75	21,7	3,99	16,5
5	Kyocera SKC85	Kyocera	85	17,4	5,02	21,7	5,34	16,5
6	Kyocera SKC130	Kyocera	130	17,6	7,39	21,9	8,02	16,5
	Precio	Años de vida	Tecnología	Tensión Máxima [V]	Longitud [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Peso [kg]
1	\$880 680	20	Monocristalino	600	462	1007	24.5	5,5
2	\$1 210 000	20	Monocristalino	600	527	1200	24.5	8,35
3	\$1 850 000	20	Monocristalino	600	1 224	1047	39.5	17
4	\$1 020 000	25	Policristalino	750	751	652	54	6
5	\$1 310 000	25	Policristalino	750	1 007	652	58	8,3
6	\$2 075 000	25	Policristalino	750	1 425	652	35.7	12,2

#### 4.1.3. TABLA DE DISEÑO.

El diseño de instalaciones de paneles solares se hace por medio de conjuntos pequeños llamados bloques, soportados en estructuras normalmente hechas en acero o aluminio sujetas al techo. Esto hace que se pueda jugar con las tensiones y corrientes máximas del total del sistema.

**Desarrollo de la tabla de diseño.**

Se debe tener en cuenta que el tamaño longitudinal de los bloques no debe ser muy grande. Primero, para una fácil instalación de las estructuras de soporte. Segundo, a mayor tamaño y altura del bloque logra una sombra más extensa, ésta puede ocasionar pérdidas del terreno útil.

Ítems de la tabla de diseño.

**Diseño:** número de referencia del diseño.

**Referencia:** Referencia del panel.

**Ancho panel:** ancho del un panel del bloque medido de norte a sur.

**Largo panel:** largo del un panel del bloque medido de oriente a occidente.

**Filas:** número de paneles por bloque contados en una columna de norte a sur.

**Columnas:** número de paneles por bloque contados en una fila de oriente a occidente.

**Ancho bloque:** ancho del bloque medido de norte a sur.

**Largo bloque:** largo del bloque medido de oriente a occidente.

**Alto del bloque:** alto máximo del bloque.

**Ancho efectivo:** Ancho del bloque medido de norte a sur en vista superior.

**Sombra de sur a norte:** Proyección de sombra mayor del panel del año sobre la superficie en las horas de 7:00 y 17:00 horas.

**Sombra de oriente a accidente:** Proyección de sombra mayor del panel del año sobre la superficie en las horas de 7:00 y 17:00 horas.

El alto del bloque debe ser congruente con la inclinación de los paneles orientados hacia el ecuador. Entre las 17:00 a las 7:00 horas la irradiancia no representa un valor significativo, por tanto no se tiene en cuenta la sombra ocasionada en este lapso de tiempo.

Como es un proceso iterativo se hará un ejemplo tipo. Se usarán las especificaciones del panel Kyocera 65 de la serie KC policristalinos (KC 65).

**Ejemplo tipo.**

Datos específicos del panel.

*Referencia = Kyocera KC65*

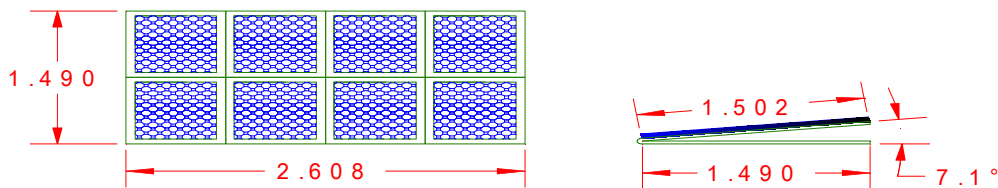
*Ancho del panel = 0,751 [m], Largo del panel = 0,652 [m]*

Las filas y columnas son de preferencia del tamaño del bloque. Por facilidad de transporte, manejo y fabricación de las estructuras de los bloque, se concordó que el tamaño de estos no deben sobrepasar medidas de 1,7 x 3 [m].

*Filas = 2, Columnas = 4*

$$\text{Ancho del bloque} = \text{Filas} \cdot \text{Ancho del panel} = 2 \cdot 0,751 = 1,502 \text{ [m]} \quad (4.1)$$

$$\text{Largo del bloque} = \text{Columnas} \cdot \text{Largo del panel} = 4 \cdot 0,652 = 2,608 \text{ [m]} \quad (4.2)$$



**Figura 4.1** Vista superior y lateral del panel espaciamento entre bloques.

*Alto del bloque = 0,186 [m], Ancho efectivo = 1,490 [m]*

El cálculo de sombras se encuentra en el anexo C.

$$\text{Sombra de sur a norte} = \text{Alto del bloque} \cdot \text{tg}(73,44) = 0,627 \text{ [m]} \quad (4.3)$$

$$\text{Sombra de oriente a occidente} = \text{Alto del bloque} \cdot \text{tg}(75) = 0,696 \text{ [m]} \quad (4.4)$$

### Tabla del diseño.

**Tabla 4.2** Resultado tabla de diseño.

Diseño	Referencia	Ancho modulo [m]	Largo modulo [m]	Filas.	Columnas.	Ancho Bloque [m]
1	Kyocera 65	0,751	0,652	2	4	1,502
2	Kyocera 65	0,652	0,751	2	4	1,304
3	Kyocera 85	1,007	0,652	2	4	2,014

4	Kyocera 85	0,652	1,007	2	4	1,304
5	Kyocera 130	1,425	0,652	1	4	1,425
6	Kyocera 130	0,652	1,425	2	2	1,304
7	AMPA - ASM55	0,462	1,007	2	4	0,924
8	AMPA - ASM55	1,007	0,462	1	8	1,007
9	AMPA - ASM80	0,527	1,200	2	4	1,054
10	AMPA - ASM80	1,200	0,527	1	8	1,200
11	AMPA - ASM150	1,224	1,047	1	4	1,224
12	AMPA - ASM150	1,047	1,224	1	4	1,047

DISEÑO	Largo bloque [m]	Alto bloque [m]	Ancho efectivo [m]	Sombra de sur a norte [m]	Sombra de este a oeste [m]
1	2,608	0,186	1,490	0,627	0,696
2	3,004	0,162	1,294	0,544	0,604
3	2,608	0,250	1,998	0,840	0,933
4	4,028	0,162	1,294	0,544	0,604
5	2,608	0,177	1,414	0,595	0,660
6	2,850	0,162	1,294	0,544	0,604
7	4,028	0,115	0,917	0,386	0,428
8	3,696	0,125	0,999	0,420	0,466
9	4,800	0,131	1,046	0,440	0,488
10	4,216	0,149	1,191	0,501	0,556
11	4,188	0,152	1,215	0,511	0,567
12	4,896	0,130	1,039	0,437	0,485

Cabe notar que cada panel tiene dos diseños debido a sus dimensiones rectangulares, parámetros de filas y de columnas. Esto hace que exista una posible gran cantidad de diseños con un solo panel. Con base en el tamaño del bloque se definieron estos valores.

#### 4.1.4. CROQUIS DEL DISEÑO.

En este paso se colocan todos los bloques posibles en la superficie. Se debe dejar una distancia de separación entre éstos, por sombras o espacio suficiente para el tránsito o mantenimiento.

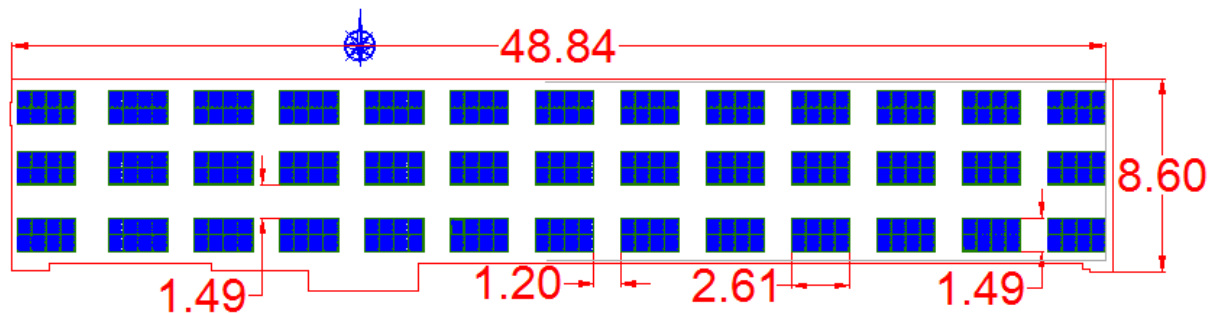


Figura 4.2 Terraza del edificio de Eléctrica, espaciamiento entre bloques.

Se puede observar que la separación entre bloques es mayor de 1,20 [m] distancia prudente para el tránsito.

#### 4.1.5. TABLA DE COSTO Y POTENCIA.

Al realizar los gráficos de todos los diseños, se sintetizan los resultados en la siguiente tabla, dados los siguientes ítems.

**Diseño:** Número de referencia del diseño.

**Referencia:** Referencia del panel.

**Número de bloques:** Cantidad de bloques posibles (dato del croquis).

**Número de paneles:** Cantidad de paneles del sistema ( $N^{\circ}$  bloques \* Filas \* Columnas).

**Potencia del panel:** Potencia pico del panel.

**Potencia del sistema:** Potencia pico del sistema ( $N^{\circ}$  \* Potencia del panel).

**Costo del panel.**

**Costo total del sistema.**

**Costo/Potencia pico:** Parámetro de criterio (costo del panel sobre potencia pico del panel).

**Factor de utilización del área:** parámetro de criterio (área de la superficie sobre la potencia pico del sistema).

**Tabla 4.3** Costo y potencia paneles.

Diseño	Referencia	Nº de bloques	Nº de paneles	Potencia pico del panel [W]	Área de la superficie [m <sup>2</sup> ]
1	Kyocera 65	39	312	65	388
2	Kyocera 65	33	264	65	388
3	Kyocera 85	26	208	85	388
4	Kyocera 85	27	216	85	388
5	<b>Kyocera 130</b>	<b>39</b>	<b>156</b>	<b>130</b>	<b>388</b>
6	Kyocera 130	36	144	130	388
7	AMPA - ASM55	36	288	55	388
8	AMPA - ASM55	40	320	55	388
9	AMPA - ASM80	32	256	80	388
10	AMPA - ASM80	27	216	80	388
11	AMPA - ASM150	27	108	150	388
12	AMPA - ASM150	32	128	150	388

Diseño	Potencia pico del sistema [kW]	Factor de utilización	Costo del panel	Costo Total	\$Costos/ Potencia pico
1	20,28	19,14	\$1 005 000	\$313 560 000	15 461
2	17,16	22,62	\$1 005 000	\$265 320 000	15 461
3	17,68	21,96	\$1 285 000	\$267 280 000	15 117
4	18,36	21,15	\$1 285 000	\$277 560 000	15 117
5	<b>20,28</b>	<b>19,14</b>	<b>\$1 825 000</b>	<b>\$284 700 000</b>	<b>14 038</b>
6	18,72	20,74	\$1 825 000	\$262 800 000	14 038
7	15,84	24,51	<b>\$880 680</b>	\$253 635 840	16 012
8	17,60	22,06	<b>\$880 680</b>	\$281 817 600	16 012
9	20,48	<b>18,96</b>	\$1 210 000	\$309 760 000	15 125
10	17,28	22,47	\$1 210 000	\$261 360 000	15 125
11	16,20	23,97	\$1 850 000	<b>\$199 800 000</b>	<b>12 333</b>
12	19,20	20,22	\$1 850 000	\$236 800 000	<b>12 333</b>

Esta tabla muestra los parámetros de selección del panel y área de la superficie. El criterio de selección se basó en el balance entre la economía (Costo/Wp) y el factor de utilización del área. Se trabajó con el diseño 5 del panel Kyocera, de la serie KC 130 – GHT2.

## 4.2. SELECCIÓN DEL INVERSOR.

Se debe hacer una base de los inversores disponibles en el mercado, mostrando las características técnicas importantes. La selección de éste debe adaptarse al proceso de selección del panel.

Tabla 4.4 Selección del inversor.							
Marca y referencia	Datos técnicos de Entrada			Datos Comerciales			
	Potencia [kW]	Tensión [Vdc]	Corriente [Adc]	Precio	Garantía		
Solectrica Pvi 3000	2,840	200 -550	16	\$5 364 000	10 años		
Solectrica Pvi 4000	3,580	200 -550	20	\$7 488 000	10 años		
Xantrex GT4.0kW 208/240 V	3,800	240 -550	17	\$6 026 000	10 años		
Xantrex GT5.0kW 208/240 V	4,500	240 -550	20	\$7 449 000	10 años		
Kaco blueplanet 360 1xi	3,600	125 -300	48	\$4 494 000	10 años		
Datos técnicos de Salida monofásica.							
Marca y referencia	Potencia [kW]	Tensión [V]	Corriente	Eficiencia	Factor de potencia	THD	Frecuencia
Solectrica Pvi 3000	2,700	208	13	95,5%	> 99%	<3%	60 [Hz]
Solectrica Pvi 4000	3,400	208	16,3	95,5%	> 99%	<3%	60 [Hz]
Xantrex GT4.0kW 208/240 V	3,800	208	18,3	96,0%	> 95%	<3%	60 [Hz]
Xantrex GT5.0kW 208/240 V	4,500	208	22	96,0%	> 95%	<3%	60 [Hz]
Kaco blueplanet 360 1xi	3,600	208	17	93,5%	> 95%	<3%	60 [Hz]

El coeficiente de distorsión armónica de los inversores de conexión a la red, debe ser menor al 3%; para no incurrir en problemas de la calidad de la energía. Los inversores trifásicos no se encuentran en el mercado colombiano. En otros países comercializan estos inversores, cuya potencia nominal es mayor a los 20 [kW].

El objetivo de este diseño es satisfacer al menos el 10% de la carga instalada. Se instalarán en total ochenta y cuatro paneles solares de potencia pico de 130 [W]. Con base en el diseño, son 21 bloques, con un total de potencia pico de 10,920 [kW].

Se separan los paneles en 3 grupos de igual cantidad, cada grupo tendrá 28 paneles, divididos en bloques de 4 de potencia 520 [W], para un total de 7 bloques por grupo, la potencia por grupo será igual 3,640 [kW].

Se instalarán tres inversores monofásicos Solectrica Pvi 4000 208/240 V, seleccionado éste por ser adecuado para el diseño.

#### 4.3. CONEXIÓN DE LOS PANELES.

El acoplamiento de los paneles al inversor es un juego de conexión de los paneles en serie o en paralelo, para elevar la tensión adecuada de conexión al inversor. Al conectar los paneles en serie, la tensión es la suma de las tensiones y la corriente permanece constante. Para la conexión en paralelo, la corriente es la suma de las corrientes y la tensión permanece constante. No es posible conectar dos paneles en paralelo y conectar éstos en serie con otro, debido a la corriente. Los paneles se conectan en serie primero para después conectarlos en paralelo con grupos del mismo tamaño. En cualquier caso, la potencia es igual a la suma de potencias individuales de los paneles sin importar la conexión.

El diseño del panel Kyocera 130 de la serie KC tiene los siguientes parámetros eléctricos:

**Potencia pico:** potencia de salida del panel a una irradiancia de 1000 [W] (130 [W]).

**Máxima tensión del sistema:** Rigidez eléctrica del panel (750 [V]).

**Tensión Nominal  $U_{mpp}$ :** Máxima tensión a condiciones nominales (17,6 [V]).

**Corriente Nominal  $I_{mpp}$ :** Máxima corriente a condiciones nominales (7,39 [A]).

**Tensión de circuito abierto:** Tensión del panel a corriente cero (21,6 [V]).

**Corriente de corto circuito:** Corriente del panel a tensión cero (8,02 [A]).

#### ANÁLISIS DE CONEXIÓN DE LOS PANELES.

A cada inversor se le conectarán 7 bloques, cada uno de 4 paneles conectados en serie. Cada bloque se conectará en serie al inversor, para un total de 28 paneles en serie por inversor.

$$Tension\ entrada\ del\ inversor = (U_{pmm} \cdot \text{paneles por bloque}) * \#\text{bloques} \quad (4.5)$$

$$\text{Tension a la entrada del inversor} = (17,6 \cdot 4)7 = 492,8 \text{ [V]} \quad (4.5)$$

$$\text{Corriente a la entrada del inversor} = I_{mpp} = 7,39 \text{ [A]} \quad (4.6)$$

$$\text{Potencia entrada del inversor} = U_{mpp} \cdot I_{mpp} = 492,8 \cdot 7,39 = 3641,8 \text{ [W]} \quad (4.7)$$

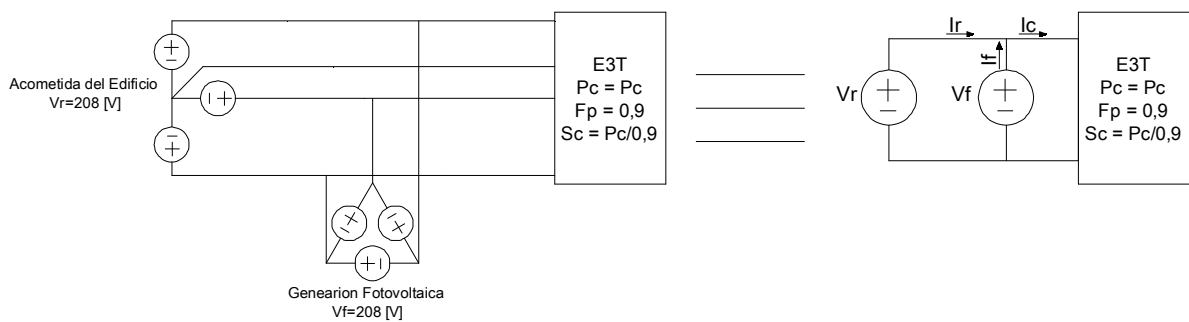
La decisión de conectar los paneles en serie, es obtener la tensión más elevada, sin sobrepasar la tensión de entrada del inversor. Elevar la tensión trae beneficios como menores pérdidas, disminución de corrientes, etc.

#### 4.4. EFECTO EN LA RED DE LA CONEXIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

Al conectar los paneles a la red por medio de los inversores se entrega potencia 99% activa. Sin embargo, con frecuencia una carga es activa e inductiva. Por tanto, es necesario analizar cómo se afecta la red en sus parámetros de potencia (figura 5.3).

Consideraciones:

- Conexión trifásica de 4 hilos.
- Carga balanceada a un factor de potencia 0,9.



**Figura 4.3** Modelo básico de conexión trifásica.

$$V_f = V_r = V \quad (4.8), \quad Q_c = \sqrt{S_c^2 - P_c^2} \quad (4.9)$$

$$S_c = V \cdot I_c^* \Rightarrow I_c = \frac{1}{3} \left( \frac{S_c}{V_c} \right)^* \quad (4.10), \quad P_f = V \cdot I_f^* \Rightarrow I_f = P_f / V^* \quad (4.11)$$

$$I_r = I_c - I_f = \frac{1}{3} \left( \frac{S_c}{V_c} \right)^* - P_f / V^* = \frac{P_c - jQ_c - P_f}{3V^*} \quad (4.12)$$

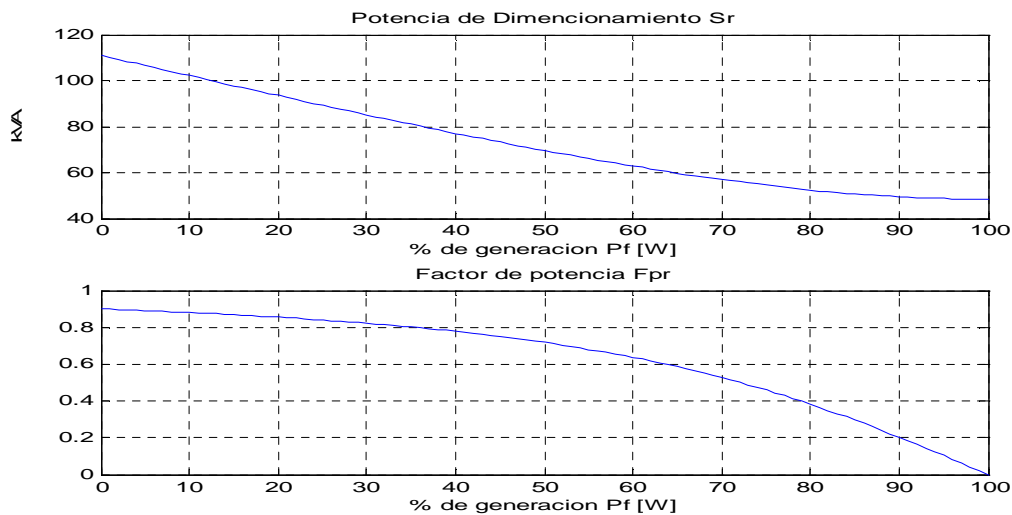
$$|I_r| = \frac{\sqrt{(P_c - P_f)^2 + Q_c^2}}{3|V|} \quad (4.13)$$

$$|S_r| = 3|V||I_r| = \sqrt{(P_c - P_f)^2 + Q_c^2} \quad (4.14)$$

$$Q_r = \sqrt{S_r^2 - (P_c - P_f)^2} = \sqrt{(P_c - P_f)^2 + Q_c^2 - (P_c - P_f)^2} = Q_c \quad (4.15)$$

$$F_{pr} = (P_c - P_f) / S_r \quad (4.16)$$

Se grafica la potencia de dimensionamiento  $S_r$ , potencia reactiva  $Q_r$  y su factor de potencia  $F_{pr}$ , en función de la potencia de generación, desde 0 hasta un 100 % de la potencia de la carga.



**Figura 4.4.A** Grafica de comportamiento de la potencia de dimensionamiento, reactiva y factor de potencia de la red.

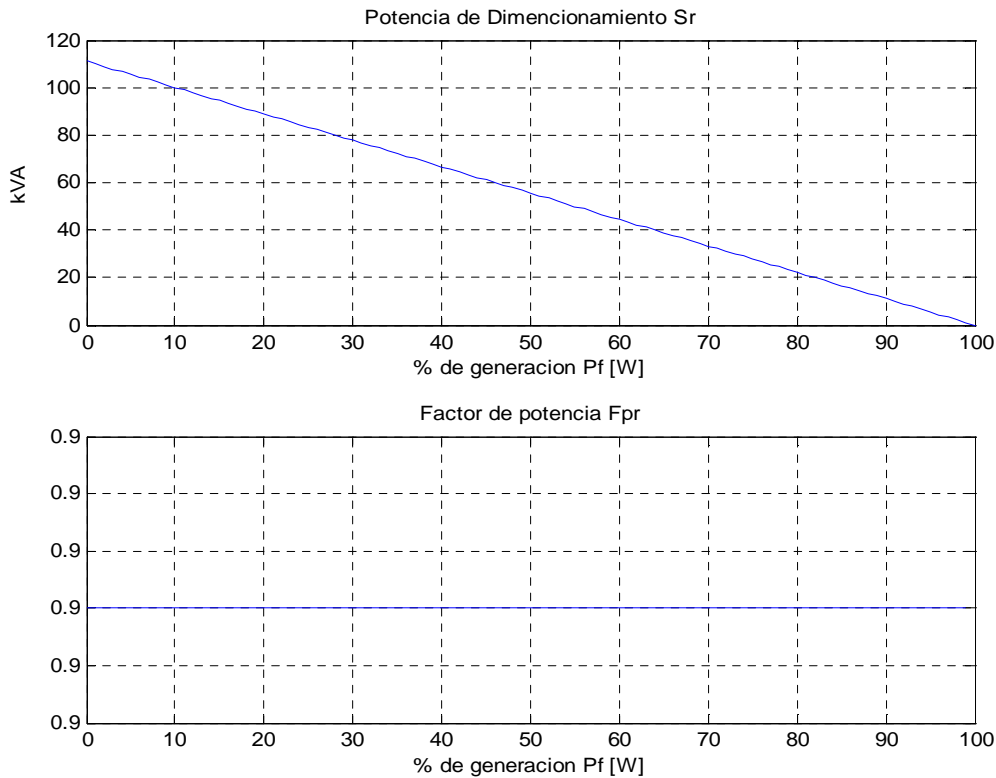
De las graficas (figura 5.4.A), se observa cómo decae la potencia de dimensionamiento y su factor de potencia, debido al no tener generación o compensación de potencia reactiva.

Si siguiendo la analogía de las ecuaciones y generando una potencia reactiva  $Q_f$ , tal que el factor de potencia de la generación sea igual al de la carga, se observa en la figura 5.4.B cómo disminuye la potencia de dimensionamiento y el factor de potencia permanece constante, al valor original de la carga.

$$|S_r| = 3|V||I_r| = \sqrt{(P_c - P_f)^2 + (Q_c - Q_f)^2} \quad (4.17)$$

$$Q_r = \sqrt{S_r^2 - (P_c - P_f)^2} = \sqrt{(P_c - P_f)^2 + (Q_c - Q_f)^2 - (P_c - P_f)^2} = Q_c - Q_f \quad (4.18)$$

$$F_{pr} = (P_c - P_f) / S_r$$



**Figura 4.4.B** Grafica de comportamiento de la potencia de dimensionamiento, reactiva y factor de potencia de la red.

Cuando la conexión no es trifásica, el efecto en la red se vuelve en algunos casos crítico (Anexo D).

#### 4.5. CÁLCULO DEL BANCO CONDENSADORES.

Lo ideal sería realizar el análisis de demanda diaria, para poder llevar a cabo un análisis detallado<sup>5</sup>. Se compensará de forma tal que se disponga de una potencia reactiva equivalente a un factor de potencia 0,9.

$$Potencia instalada = P_{int} = 10,920 [kW]$$

$$Potencia de compensacion = Q_{cp} = \sqrt{S^2 - P_{int}^2} = \sqrt{\left(\frac{P_{int}}{0,9}\right)^2 - P_{int}^2} \quad (4.19)$$

$$Potencia de compensacion = Q_{cp} = \sqrt{\left(\frac{10,92}{0,9}\right)^2 - 10,92^2} = 5,289 [kVAR] \quad (4.20)$$

Se ajusta el valor a:

$$Potencia de compensacion = 6,000[kVAR]$$

---

<sup>5</sup> El edificio Eléctrica repotenciado de la escuela E<sup>3</sup>T no se encuentra en funcionamiento.

#### 4.6. BOSQUEJO DE DE LA CONEXIÓN.

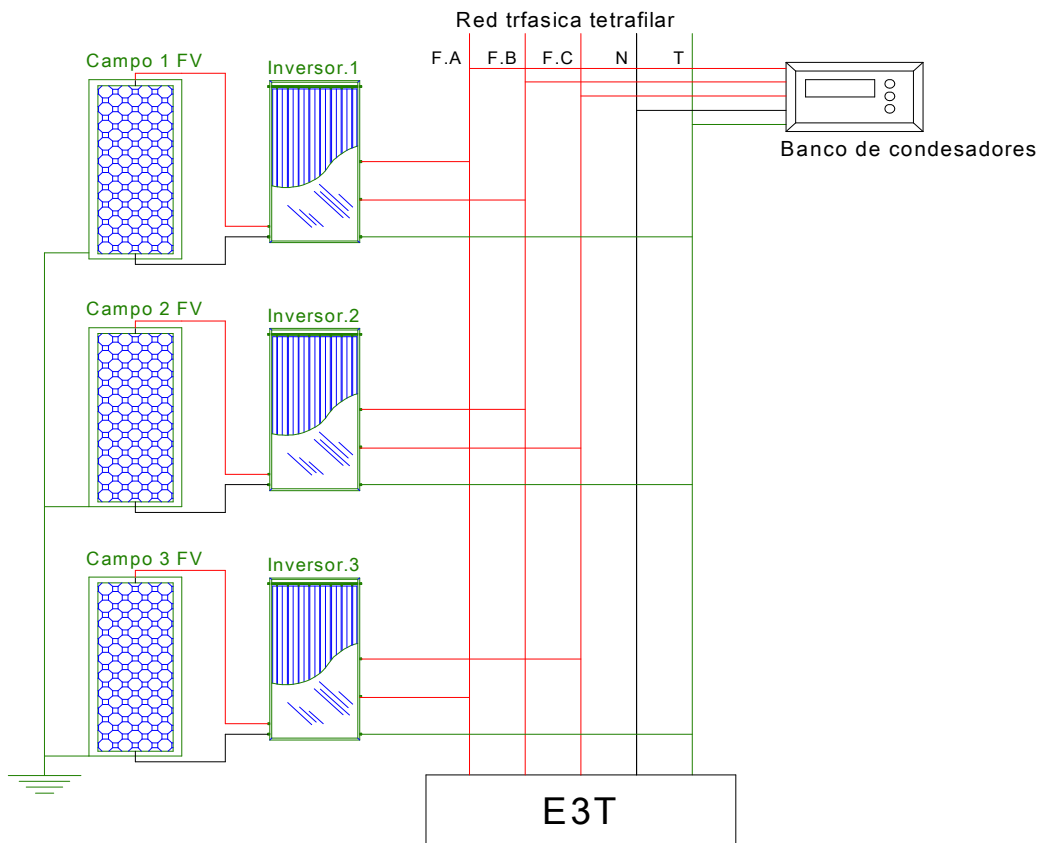


Figura 4.5 Bosquejo de conexión del diseño a la red.

#### 4.7. SELECCIÓN DE LOS CONDUCTORES.

Para el cálculo de la capacidad de corriente se deben tener en cuenta las consideraciones establecidas en la NTC 2050, sección 690-8 y 690-9.

Cálculo de la corriente del circuito. La corriente para un tipo individual de circuito se debe calcular como sigue:

- 1) Circuitos de la fuente fotovoltaica. Es la suma de la corriente nominal de cortocircuito de los módulos en paralelo.

- 2) Circuito de salida fotovoltaica. Es la corriente nominal de cortocircuito de la fuente de alimentación fotovoltaica.
- 3) Circuito de salida del inversor. Es la corriente nominal de salida del inversor o de la unidad de acondicionamiento de energía.

#### 4.7.1. CÁLCULO DEL CONDUCTOR DE LA FUENTE FOTOVOLTAICA Y SALIDA FOTOVOLTAICA.

La corriente por los conductores del circuito de la fuente fotovoltaica (paneles) y circuitos de entrada al inversor (que en este caso es el mismo de salida fotovoltaica) es la misma, por tanto sólo se calculará la de uno solo (fuente fotovoltaica) y el resultado aplica para todos.

**Corriente en el circuito de la fuente fotovoltaica:** debido a que todos los módulos y además los bloques están conectados en serie, la corriente de salida fotovoltaica es la corriente nominal de cortocircuito por catalogo del fabricante de los paneles.

$$I = 8,02 \text{ A}$$

Según la sección 690-8 a). de la NTC 2050, se debe ajustar la capacidad de corriente de los conductores, la cual no debe ser inferior al 125% de la calculada.

La capacidad de corriente de los conductores es:

$$I \cong 10 \text{ A}$$

Teniendo en cuenta que la regulación de tensión debe ser menor del 1.5%, se selecciona el calibre del conductor.

$$\Delta V = V \cdot 1,5\% = 492,8 \cdot 0,015 = 7,392 \text{ [V]} \quad (4.21)$$

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

$$S = \frac{L \cdot I}{\gamma \cdot \Delta V} \quad (4.22)$$

En donde:

$L$ : longitud del conductor.

$I$ : capacidad de corriente del conductor = 10 [A].

$\Delta V$ : caída de tensión = 7,392 [V].

$\gamma$ : conductividad del cobre (a 70°C) = 46,82 [m/Ω mm<sup>2</sup>].

Distancia máxima posible horizontal desde la salida de los módulos en la azotea hasta el buitrón 20 [m].

Distancia vertical de bajada de los conductores desde la azotea hasta el primer piso 16 [m].

Distancia desde el buitrón hasta el inversor 3 [m].

Longitud del conductor del circuito fotovoltaico de salida  $(20 + 16 + 3) \cdot 2 = 78$  [m].

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

$$S = \frac{78 \cdot 10}{46,82 \cdot 7,392} = 2,25 \text{ mm}^2 \quad (4.22)$$

De la tabla 310-16 de la NTC, se seleccionó el conductor # 12 AWG THW Cu, con sección transversal de 3,3 [mm<sup>2</sup>]. Con el conductor se logra una regulación porcentual de tensión del 1,035%:

$$\% \Delta V = \frac{\frac{L}{\gamma \cdot S} I}{V - \frac{L}{\gamma \cdot S} I} \cdot 100 = \frac{\frac{78}{46,82 \cdot 3,3} \cdot 10}{492,8 - \frac{78}{46,82 \cdot 3,3} \cdot 10} \cdot 100 = 1,035 \% \quad (4.23)$$

Pérdidas de potencia:

$$\%P = \frac{3 \frac{L}{\gamma \cdot S} \cdot I^2}{3P} \cdot 100 = \frac{3 \frac{78}{46,82 \cdot 3,3} \cdot 7,39^2}{3 \cdot 3,640 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0,757 \% \quad (4.24)$$

Aceptables en el diseño.

#### 4.7.2. CÁLCULO DEL CONDUCTOR DE SALIDA DEL INVERSOR.

Corriente por los conductores del inversor a la red.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{3640}{208} = 17,5 [A] \quad (4.25)$$

La capacidad de corriente del conductor se debe corregir con un 125% de la calculada, por tanto:

$$I = 1,25 \cdot 17,25 = 21,875 [A] \quad (4.26)$$

Se selecciona el conductor calibre número 10 AWG THW Cu debido a la restricción de la tabla 310-16 de la NTC 2050. Dadas las especificaciones del fabricantes del inversor, se aplica una protección contra sobrecorriente de 25 [A].

Pérdidas de potencia:

$L$ : longitud del conductor del inversor a la conexión de red = 6 [m]

$$\%P = \frac{3 \frac{L}{\gamma \cdot S} I^2}{3P} \cdot 100 = \frac{3 \cdot \frac{6}{46,82 \cdot 5,25} \cdot 17,5^2}{3 \cdot 3,640 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0,205 \% \quad (4.27)$$

$$\text{Total \%P} = \%P_{\text{continua}} + \%P_{\text{alterna}} = 0,757 + 0,205 \% \cong 1\% \quad (4.28)$$

#### 4.7.3. CÁLCULO DE DUCTOS DE LOS CONDUCTORES.

Teniendo en cuenta las especificaciones de la NTC 2050 se seleccionan los ductos:

<b>Tabla 4.5</b> Diámetro ductos de los conductores.	
SECCIÓN	DIÁMETRO
Interconexión de paneles	1/2"
Fuente de salida fotovoltaica	1/2"
Desde el circuito fotovoltaico de salida hasta el inversor	1"
Desde la salida del inversor hasta el barraje de conexión.	1"

#### **4.8. CÁLCULO DE PROTECCIONES.**

Medios de desconexión: para calcular los seccionadores se debe tener en cuenta lo establecido por la NTC 2050, capítulos 690-literal C y la sección 230-literal F.

La corriente por los conductores del circuito de la fuente fotovoltaica y por ende también por el circuito de entrada al inversor es la misma. Por tanto, los seccionadores tendrán las mismas características.

Se instalarán seccionadores de 15 [A].

Protección contra sobrecorriente: para calcular las protecciones contra sobrecorriente se debe tener en cuenta lo establecido por la NTC 2050 capítulos 690-9 y la sección 240.

- Se instalarán interruptores automáticos de 15 [A], en los circuitos de la fuente fotovoltaica y en los de entrada al inversor.
- Se instalara una protección de 25 [A], a la salida del inversor.

## 5. ANALISIS FINANCIERO DEL PROYECTO.

Para realizar el análisis financiero del proyecto se deben destacar los principales ITEMS o elementos fuertes de la inversión. Una vez se reconocen y se cuantifican, se procede a estimar los ingresos generados por la implementación del proyecto. En este caso se representa por tres aspectos importantes: uno es el ahorro que se obtiene al dejar de comprar energía eléctrica a la red de distribución local, el segundo comprende la ganancia representada en el aprendizaje que se obtenga por parte de docentes y estudiantes en el estudio de esta tecnología y el tercero representa la ganancia medioambiental que se obtiene.

### 5.1. INVERSIÓN INICIAL.

Los elementos principales para la determinación de la inversión inicial son:

- módulos solares fotovoltaicos.
- Soportes de los módulos.
- Bancada de inversores.
- Sistema de compensación de reactivos.
- Otros.

#### 1). módulos solares fotovoltaicos

La inversión de los módulos solares está determinada por la cantidad de módulos que se necesitan para satisfacer los requerimientos del proyecto y el precio de cada unidad. Este valor puede variar según la cantidad que se compren.

Para este caso se requieren 84 módulos solares Policristalino, marca Kyocera, modelo Kyocera KC130-GHT2, cuyo precio unitario es \$1 825 000 pesos y el total de la inversión en módulos es de \$153 300 000 pesos.

## 2). Soporte de los módulos

Los módulos solares se deben inclinar para obtener un máximo rendimiento a la hora de la conversión de energía solar a eléctrica. Por esto se requieren los soportes. El precio unitario de los soportes de los bloques es del orden de los \$500 000 pesos. Por tanto, la inversión total de los 21 soportes para módulos solares es de \$10 500 000 pesos.

## 3). Bancada de Inversores.

Como la mayoría de equipos obtienen la energía de la red en corriente alterna y los módulos solares suministran la energía por medio de corriente continua, se hace necesaria la adquisición de un inversor de corriente que transforma la corriente de CC a AC. Se debe analizar las posibles conexiones de inversores con la red de suministro local y los efectos que provocan. Como resultado, y con base en las normas técnicas colombianas, se obtiene que la mejor conexión es la trifásica. El mercado colombiano no maneja inversores trifásicos y en el mercado extranjero los inversores manejan potencias muy elevadas, lo cual llevaría a un sobre dimensionamiento. La conexión adecuada es una bancada de tres inversores monofásicos, de tensión entre líneas de 208 V, conectados de tal forma que simulen una conexión trifásica. El costo de cada inversor monofásico Solectria PVI\_4000 es de \$7 488 000 pesos. Por tanto la inversión total en inversores de corriente es \$22 464 000 pesos.

## 4). sistema de compensación de reactivos.

Debido a que el sistema de suministro de energía solar sólo genera potencia activa (P), la carga del edificio de la E3T deberá obtener su potencia reactiva (Q) de la red de la ESSA. Esto provoca que el factor de potencia disminuya drásticamente, incurriendo en penalizaciones y pagos por la energía reactiva. La solución es instalar un banco de condensadores con el objetivo de compensar la generación de reactivos y mejorar el factor de potencia de la carga.

El sistema de compensación trae integrado la bancada de condensadores, el medio de desconexión, las protecciones contra sobrecorriente, el dispositivo regulador de Q, etc. El Costo es \$2 000 000 de pesos.

5). Otros

En esta inversión van incluidas las protecciones, conectores, cableado, ductos y medios de desconexión del sistema. Para un precio estimado de \$5 000 000 de pesos.

<b>Tabla 5.1</b> Inversión inicial.	
<b>Elemento.</b>	<b>Costo</b>
Módulos solares fotovoltaicos.	\$153 300 000
Soportes de los módulos.	\$10 500 000
Bancada de inversores.	\$22 464 000
Sistema de compensación de reactivos.	\$2 000 000
Otros	\$5 000 000
TOTAL	\$193 264 000

## 5.2. INVERSIONES POSTERIORES.

Las inversiones adicionales posteriores a la inicial son:

Mantenimiento del sistema fotovoltaico: son de gran importancia permitiendo garantizar la durabilidad y la eficiencia de los módulos solares y el correcto funcionamiento de sistema fotovoltaico.

Los módulos solares tienen una vida útil (hasta el 80% de la potencia pico) de 25 años, garantizada por el fabricante. Por tanto, el mantenimiento de los módulos se empieza a realizar a partir del quinto año, en periodos anuales. El costo de

mantenimiento anual alcanza los \$250 000 pesos y se realizará a partir del quinto año hasta el año 25.

Los inversores de corriente tienen una vida útil garantizada (eficiencia al 96%) de 10 años, pero su funcionamiento final alcanza los 25 años. Por tanto en el mantenimiento de los inversores se estima un costo de \$100 000 anual, a partir del tercer año de funcionamiento y hasta el año 25.

La inversión anual en mantenimiento para el sistema de compensación de reactivos es de \$100 000, empezando en el tercer año de servicio hasta el año 12, en donde se deberá reemplazar la bancada de condensadores.

El mantenimiento de “otros” se estima en \$50 000 anuales a partir del 3 año.

Reemplazo de elementos del sistemas

Se debe sustituir la bancada de condensadores debido al envejecimiento y daño de los materiales. El costo de la sustitución alcanza los \$2 000 000.

### **5.3. ESTIMACIÓN DE LOS INGRESOS.**

Del sistema de suministro de energía eléctrica con tecnología solar fotovoltaica se obtiene energía para satisfacer parte de las necesidades del edificio Eléctrica de la UIS; Es decir, la energía generada se verá reflejada en la factura de cobro de la empresa electrificadora ESSA. Para determinar los ingresos del proyecto se debe: 1) cuantificar la energía que se obtendrá del sistema solar, 2) conocer el precio del kilowatt-hora consumido y 3) aplicar el estudio financiero a los datos obtenidos en los numerales 1) y 2), para conocer el valor presente neto y mirar la viabilidad del proyecto.

### 5.3.1. CUANTIFICACIÓN DE LA ENERGÍA GENERADA

El fabricante de los módulos solares garantiza que la potencia pico de generación no se reducirá más del 10% a los 12 años y 20% a los 25 años.

La capacidad de generación con respecto al tiempo de vida del sistema solar fotovoltaico se muestra en la siguiente figura:

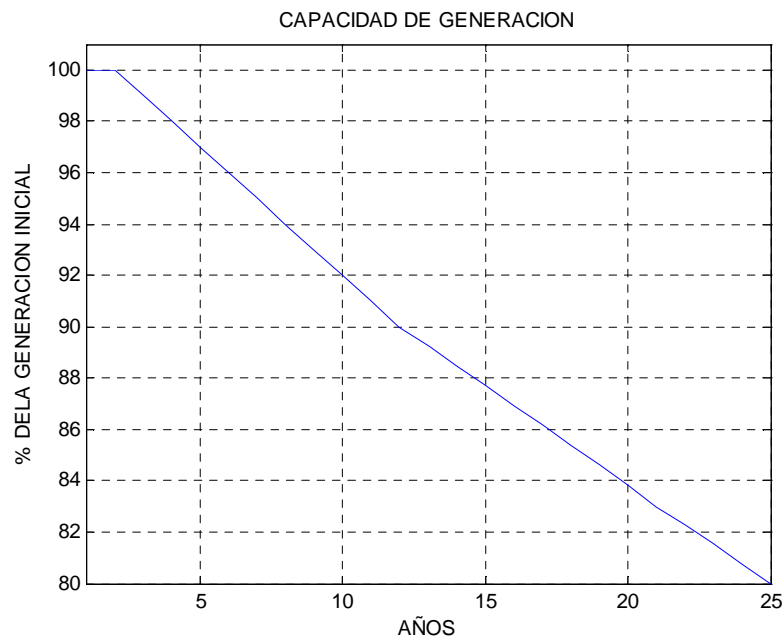


Figura 5.1 Capacidad de Generación del sistema fotovoltaico en el tiempo de vida útil.

Potencia Pico de Generación: Se tabulan los datos obtenidos de la potencia pico del sistema a través de todo el periodo de vida útil del proyecto, tomando como base la información de la figura 5.1.

Energía Generada: la energía generada es el producto de la potencia pico de generación de cada año, el valor estadístico promedio anual de Horas Picos Sol (5,164 [HPS]), analizado en la sección 4, y el número de días del año.

Por tanto la generación de energía en el transcurso de un año se calcula mediante la fórmula:

$$E_g' = P_{\text{pico}} \cdot \text{HPS} \cdot 365$$

La energía generada se debe corregir debido a las pérdidas de potencia por los conductores (1%) y la bancada de inversores (4,5 %).

$$E_{\text{util}} = (0,955 \cdot 0,99)E_g' = 0.945 \cdot E_g'$$

La tabla 5.2 muestra la potencia pico de generación a lo largo de la vida útil del proyecto (25 años) y la energía real de generación.

<b>Tabla 5.2</b> Potencia pico de generación y energía útil generada durante 25 años.			
AÑO	% DE LA GENERACIÓN INICIAL	POTENCIA PICO DE GENERACIÓN [kW]	ENERGÍA UTIL GENERADA [MWh]
1	100	10,920	19,450
2	100	10,920	19,450
3	99	10,810	19,256
4	98	10,701	19,061
5	97	10,592	18,867
6	96	10,483	18,672
7	95	10,374	18,478
8	94	10,264	18,283
9	93	10,155	18,089
10	92	10,046	17,894
11	91	9,937	17,700
12	90	9,828	17,505
13	89,23	9,744	17,355
14	88,46	9,660	17,206
15	87,69	9,576	17,056
16	86,92	9,492	16,907
17	86,15	9,408	16,757
18	85,38	9,324	16,607
19	84,62	9,240	16,458
20	83,85	9,156	16,308
21	83,08	9,072	16,158
22	82,31	8,988	16,009
23	81,54	8,904	15,859
24	80,77	8,820	15,710
25	80	8,736	15,560

### 5.3.2. PRECIO DE LA ENERGÍA.

La Universidad Industrial de Santander (UIS) tiene una tarifa triple horaria para el servicio de la energía eléctrica que va en bloques de tiempo ya definidos.

La tabla 5.3 muestra el precio que paga la UIS por la energía eléctrica, (precios a diciembre de 2009)

**Tabla 5.3** Tarifa energía UIS.

PERIODO HORARIO [h]	PRECIO \$
00:00 – 06:00	211,15
06:00- 17:00 19:00- 00:00	243,73
17:00- 19:00	282,19

La tarifa que aplica para el análisis financiero es la comprendida entre las 06:00 y las 17:00 horas y corresponde a un valor del kWh de \$ 243,73 pesos.

#### **Precio de la energía en tres escenarios.**

- **Caso 1.**

El precio de cada kWh que genera la universidad es equivalente al que tiene que pagar a la ESSA por el servicio de suministro de energía eléctrica.

- **Caso 2.**

Se supone un incremento del precio del kWh de 5.2% anual por encima de la inflación, esto debido a la crisis energética generada por la escasas reservas y su reducida extracción de petróleo y carbón.

- **Caso 3.**

Se supone políticas gubernamentales de incentivos a los generadores de energía con tecnologías renovables, en la cual se paga al generador el 200% del valor del kilovatio en el lugar en donde inyecte la energía a la red.

#### **5.4. ESTUDIO FINANCIERO.**

El proyecto tiene como base garantizar una parte de la energía para la universidad e incentivar el conocimiento de la comunidad académica sobre la generación de energía con tecnología Fotovoltaica, acompañado del impacto positivo al ambiente y a la sociedad, por tanto, la UIS no espera rubro en la ejecución del proyecto, entonces, la tasa de oportunidad es igual a cero.

El estudio financiero del proyecto se realizara con el modelo de pesos constantes, de tal forma que todas las cifras tanto ingresos como egresos se puedan comparar más fácilmente y así poder obtener la utilidad y viabilidad del proyecto.

##### **Costo total presente del proyecto:**

En pesos constantes el valor presente de las inversiones se toma como el número de veces que se realiza cada inversión multiplicada por el valor individual de la inversión en el periodo cero (inversión inicial).

##### **Ingresos totales presentes del proyecto:**

Para determinar el ingreso total presente del proyecto se deben tener en cuenta los tres casos del valor del kWh; Se debe multiplicar el precio del kWh por la capacidad de generación de energía del sistema solar para cada año, luego sumar los ingresos de cada año para obtener los ingresos totales del proyecto

##### **Evaluación de la inversión.**

Valor presente de las inversiones:

**Tabla 5.4** Valor presente de las inversiones.

TIPO DE INVERSIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR PRESENTE DE LAS INVERSIONES
Mantenimiento	20	\$500 000	\$10 000 000
Sustitución de Equipos	1	\$2 000 000	\$2 000 000
Inversión Inicial	1	\$193 264 000	\$193 264 000
TOTAL			\$ 205 264 000

- **Caso 1.**

Valor presente de los ingresos:

**Tabla 5.5.A** Valor presente de los ingresos caso1.

TIPO DE INGRESO	VALOR PRESENTE DE LOS INGRESOS
Reducción de consumo de la red local	\$108 175 395

Se observa que el valor presente de los ingresos es muy inferior al valor presente de las inversiones.

- **Caso 2.**

Valor presente de los ingresos:

**Tabla 5.5.B** Valor presente de los ingresos caso2.

TIPO DE INGRESO	VALOR PRESENTE DE LOS INGRESOS
Reducción de consumo de la red local	\$207 115 827

Se observa que el valor presente de los ingresos es inferior al valor presente de las inversiones.

- **Caso 3.**

Valor presente de los ingresos:

**Tabla 5.5.C** Valor presente de los ingresos caso3.

TIPO DE INGRESO	VALOR PRESENTE DE LOS INGRESOS
Reducción de consumo de la red local	\$216 350 791

Se observa que el valor presente de los ingresos es levemente superior al valor presente de las inversiones.

### **La utilidad del proyecto:**

#### **Utilidad financiera.**

- **Caso 1.**

El valor presente estimado de la utilidad es: \$-97 088 604 que corresponde aproximadamente a -47,3% del valor de la inversión total del proyecto.

- **Caso 2.**

El valor presente estimado de la utilidad es: \$1 851 827 que corresponde aproximadamente a 0,9% del valor de la inversión total del proyecto.

- **Caso 3.**

El valor presente estimado de la utilidad es: \$11 086 791 que corresponde aproximadamente a 5,4% del valor de la inversión total del proyecto.

#### **Utilidad Académica.**

El desarrollo de este tipo de proyectos fomenta el interés en la población universitaria hacia la investigación y apropiación del conocimiento en el área fotovoltaica, desarrollando un cambio cultural, social y tecnológico en la utilización de la energía.

Se da un paso gigante en la validación de los conceptos teóricos sobre energía solar, generando lazos más fuertes en la captación de los conocimientos

Se deja abierta la posibilidad de creación de una asignatura enfocada en el estudio de la energía solar, en donde los estudiantes tengan el recurso de visitar la planta de generación fotovoltaica, en la terraza del edificio E3T.

**Utilidad Ambiental.**

Con el desarrollo del proyecto se reduce la quema de carbón y gas en las plantas térmicas de generación de energía, disminuyendo la emisión de gases contaminantes del medio ambiente, potenciadores del efecto invernadero y destructores de la capa de ozono. La utilidad ambiental es de extrema importancia, ayudando a mejorar la calidad de vida de los seres vivos.

**Tabla 5.6** Emisión de CO<sub>2</sub> de plantas térmicas.

	ENERGÍA GENERADA [kWh]	CO <sub>2</sub> QUE SE EVITARÍA EMITIR SI SE GENERARA CON PLANTAS TÉRMICAS TIPO [kg]	
		CARBÓN	GÁS
CO <sub>2</sub> /kWh	1	1	0.4
ANUAL	17 466	17,466x10 <sup>3</sup>	6,986x10 <sup>3</sup>
25 AÑOS	436 666	436,66x10 <sup>3</sup>	174,66x10 <sup>3</sup>

## **OBSERVACIONES.**

Las fuentes de energía convencionales o tradicionales están llegando al límite de reservas existentes, mientras la demanda de energía mundial cada día va en crecimiento. Esto vislumbra una crisis energética, provocando un aumento del precio de la energía eléctrica, dándole a la energía solar fotovoltaica una mayor competitividad en el mercado.

La conexión monofásica de sistemas fotovoltaicos a la red trae desbalances, problemas de factor de potencia y efectos no deseados en la potencia de generación. Se ve de la necesidad de conectarse trifásicamente, pero en el mercado colombiano no se encuentra inversores trifásicos. El diseñador se ve en la necesidad de utilizar bancadas monofásicas de inversores, lo que aumenta significativamente el costo.

## **RECOMENDACIONES.**

Se debe estudiar la posibilidad de eliminar los aranceles para los productos necesarios en la implementación de energías limpias. Esto disminuirá el costo de inversión del proyecto y motivará el desarrollo de nuevos proyectos de fuentes de energía limpias.

Se debe analizar la posibilidad de incluir en las leyes colombianas, artículos sobre incentivos a la generación de energía renovables, con el motivo de promover el desarrollo de esos proyectos.

Se deben incentivar la investigación en el desarrollo de las células fotovoltaicas, esta investigación tiene un gran recorrido por dar dado que la eficiencia es del dieciséis por ciento.

## CONCLUSIONES.

Los sistemas de generación de energía eléctrica con tecnología solar, son una alternativa favorable en el ámbito ambiental, dado que ésta no produce emisiones perjudiciales para el medio ambiente y calentamiento global.

Bucaramanga se encuentra en una posición latitudinal del 7,13°. Una posición favorable para la tecnología solar fotovoltaica, ya que el ángulo de incidencia de los rayos solares (cenit), se encuentra comprendido entre los valores de 75° y 120°. En el lapso de un año el ángulo cenit en dos ocasiones toma el valor de 90°, ángulo más favorable para el panel fotovoltaico. En los países por fuera de la zona tropical, el cenit toma valores promedio más bajos.

La literatura de las nuevas tecnologías fotovoltaicas es relativamente baja. Además de ser lecturas con conclusiones cruzadas unas con otras, debido a que en la mayoría son escritas por fabricantes de los mismos módulos. Es necesario recordar que cada diseño es único y la selección de la tecnología depende de las necesidades del diseño. Por eso, antes de tomar la decisión es conveniente contrastar varios puntos de vista.

La tecnología de los paneles fotovoltaicos viene en un fuerte crecimiento. A la fecha el porcentaje de conversión de energía solar a energía eléctrica, en las células cristalinas, es alrededor de un 16%. Por tanto, hay una pérdida de energía del 84%. En consecuencia, hay un camino bastante largo por recorrer en la investigación. En caso de mejorar la eficiencia de conversión al 80%, para una misma área de utilización, el potencial de la terraza del edificio E3T respecto al diseño sería alrededor de 100 [kW].

El almacenamiento de la energía en baterías no se hace necesario. Primero las baterías se usan en sistemas fotovoltaicos aislados a la red, para un suministro constante debido al costo de levantar una red de distribución. Esto hace competitivo el costo de la batería. Segundo, el edificio E3T no tiene una carga indispensable que justifique la inversión de las baterías.

El estado financiero muestra que son necesarias políticas de incentivos al generador, estas están sustentadas por la reducción de las emisiones de gases nocivos, el no consumo de las reservas de energéticas del país aumentado sostenibilidad energética.

El análisis financiero arroja que para lograr la rentabilidad favorable, se necesitan incrementos superiores al 5,2 % anual por encima de la inflación del precio de la energía, este incremento no es imposible, debido a que a partir del 2010<sup>6</sup> las reservas energéticas y la extracción de crudo se van reducir sustancialmente.

---

<sup>6</sup> Fuente ASPO (*The Association for the Study of Peak Oil and Gas*)

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA. Copyright 2005.
- [2] Energía renovables. Mario Ortega Rodríguez. 2ª edición 1999 COPYRIGHT.
- [3] Mohamed A. El- Sharkawi. ELECTRIC ENERGY AN INTRODUCTION. CRC Press 2005.
- [4] EASTECH SOLAR, S.A.U. [http://www.eastech.es/producto/thinfilm\\_sp.pdf](http://www.eastech.es/producto/thinfilm_sp.pdf)
- [5] SOLARWEB.net <http://www.solarweb.net/forosolar/aspectos-tecnicos/>
- [6] SCRIB <http://www.scribd.com/doc/4246561/Investigacion-e-industria-fotovoltaica-en-Alemania>
- [7] Universidad de Cantabria España <http://www.diee.unican.es/>
- [8] Enciclopedia instalaciones de energía solar Tomo V. Tercera edición 1993 PROGENSA.
- [9] Electrónica de potencia conversión CC/CA, Ángel Vernavá.
- [10] SYSCOM [http://www.syscom.com.mx/PDF/inclinacion\\_modulos.pdf](http://www.syscom.com.mx/PDF/inclinacion_modulos.pdf)
- [11] Universidad De Castilla-La Mancha [http://www.info-ab.uclm.es//labelec/Solar/Solar\\_Fotovoltaica/componentes.htm](http://www.info-ab.uclm.es//labelec/Solar/Solar_Fotovoltaica/componentes.htm)
- Pagina web radiaciones actualidad. [www.radiaciones.net](http://www.radiaciones.net).
  - Fausto O. Sarmiento <http://www.ensayistas.org/critica/ecologia/diccionario/z.htm>
  - Manual sobre energía renovable solar fotovoltaica, Copyright 2002, BUNCA, Septiembre del 2002.
  - Gregorio Gil García. ENERGIAS DEL SIGLO XXI. 2008.
  - Fernández Salgado. GUÍA COMPLETA DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y TERMOELÉCTRICA.

- Ministerio de industria de España. <http://www.mityc.es/es-ES/Paginas/index.aspx>
- Javier Martín Jiménez. SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS. Año 2008.
- Anne Labouret y Michel Viloz ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA. MANUAL PRÁCTICO Año 2008.
- Terry Galloway. LA CASA SOLAR. Guía de diseño, construcción y mantenimiento.
- CIEMAT. Fundamentos, dimensionado y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica. (1999).
- KNOPF, Hannes. ANALYSIS, SIMULATION, AND EVALUATION OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) METHODS FOR A SOLAR POWERED VEHICLE. PORTLAND STATE UNIVERSITY. (1999).

## ANEXOS.

### ANEXO A. MOVIMIENTO RELATIVO SOL-TIERRA.

La fuerza de atracción que ejerce el Sol a la Tierra hace que nuestro planeta constantemente este girando alrededor de él, describiendo una trayectoria en forma de elipse, con el sol en uno de los focos de esta elipse. La línea imaginaria que describe la trayectoria anual de la Tierra en su movimiento aparente con respecto al Sol recibe el nombre de *eclíptica*, esta trayectoria (eclíptica) está contenida en un plano al que llamamos *plano de la eclíptica*, figura A.1, este movimiento de traslación se efectúa a una velocidad promedio de 29,5 [km/s] y su distancia con respecto del sol está descrita por la ecuación [Anexo1]:

$$R = \frac{a(1 - e^2)}{(1 + e \cos \alpha)} \quad (A.1), \quad \alpha = \frac{2\pi(nd - 1)}{365} \quad (A.2)$$

$R$  = distancia Tierra Sol.

$a$  = unidad astronómica ( $d_{s-t} = 1,4946 \cdot 10^{11}$  [m])

$e$  = excentricidad de la órbita terrestre,  $e = 0,0167$ .

$\alpha$  = posición angular de la Tierra en la órbita.

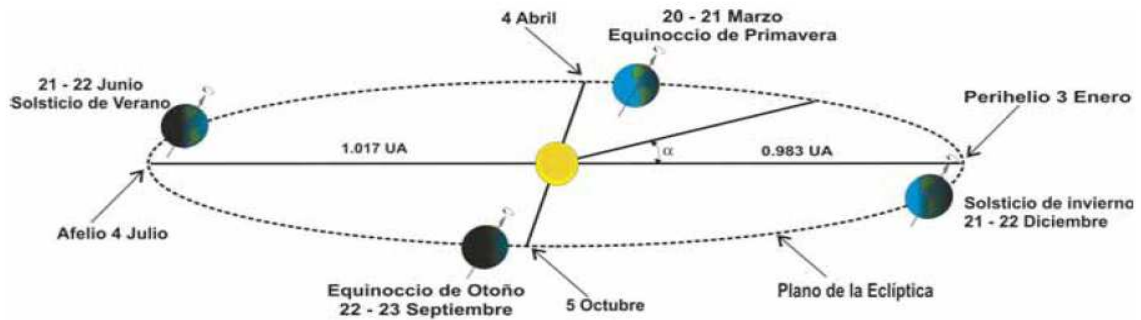
$nd$  = número del día del año.

Al punto más cercano de la órbita de la Tierra con respecto al Sol se le llama *Perihelio*, esto ocurre Cuando  $\alpha = 0^\circ$  (3 de enero) y su distancia con respecto al Sol es:

$$R = a(1 - e) = 0,983 [UA] \quad (A.3)$$

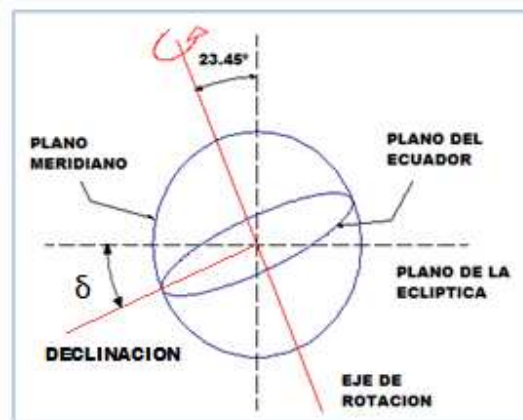
Cuando  $\alpha = 180^\circ$ , la Tierra se encuentra en el punto más lejano al Sol, este punto se llama el afelio (4 de julio) y su distancia con respecto al Sol es [Anexo1]:

$$R = a(1 - e) = 1,017 [UA] \quad (A.4)$$



**Figura A.1** Movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol.  
 Fuente: atlas de radiación solar de Colombia.

La Tierra además de trasladarse alrededor del Sol, da vueltas sobre sí misma, a esto se le llama movimiento de rotación terrestre, el eje de rotación atraviesa la Tierra de Norte a Sur y está inclinado con respecto al plano de la eclíptica un Ángulo constante [2], esto quiere decir que en el transcurso del recorrido de traslación, el eje de rotación **siempre** conserva el mismo ángulo con la perpendicular al plano de la eclíptica. Este ángulo vale  $23,45^\circ$  (Figura A.2).



**Figura A.2** Inclinación del eje de rotación de la Tierra.

La declinación  $\delta$ , es el ángulo que forman los rayos solares, (en la figura A.2 tomarían el lugar de la línea punteada horizontal izquierda) con el plano del

ecuador, y según la figuras A.3 y A.4, toma el valor de  $23,45^\circ$  y  $-23,45^\circ$  para los solsticios y en los equinoccios toma el valor de  $0^\circ$ .

Esta inclinación de la Tierra hace que a lo largo del año, el ángulo de incidencia de los rayos solares con respecto a la perpendicular al plano de la superficie terrestre en un punto determinado cambie (ángulo cenit), por ejemplo en el solsticio de verano en el Ecuador (a  $0^\circ$  latitud) el ángulo de incidencia de los rayos es de  $-23,45^\circ$  con respecto a la vertical, mientras que en el solsticio de invierno cambia a  $23,45^\circ$  (Figuras A.3 y A.4).

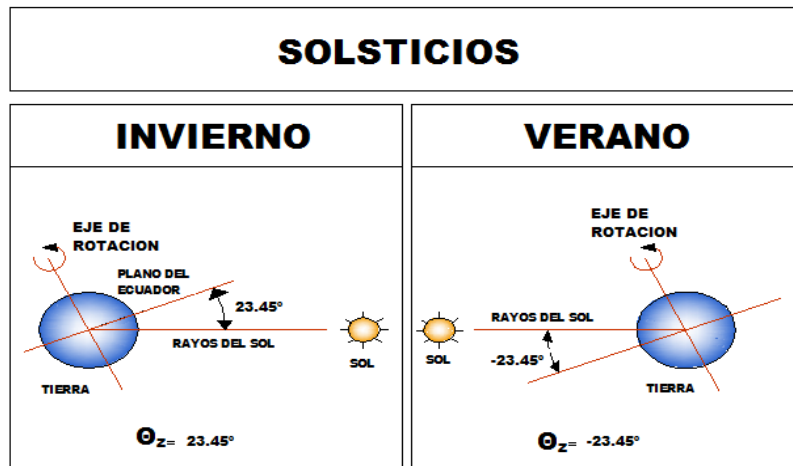


Figura A.3 Ángulo de incidencia de los rayos solares en el ecuador en época de solsticios.

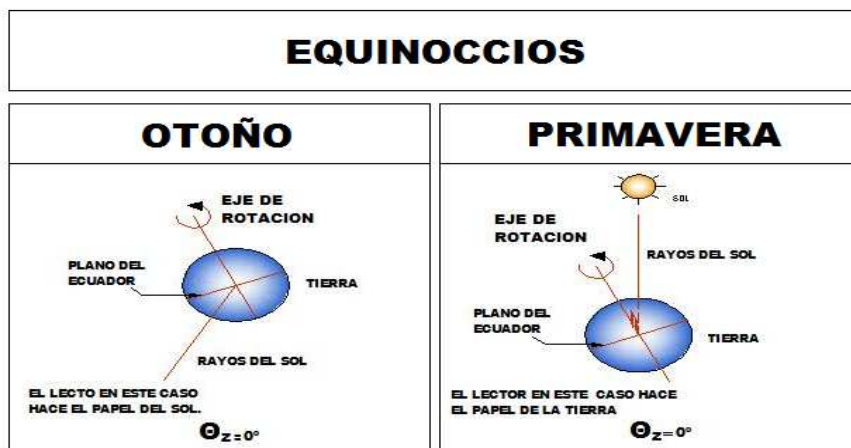


Figura A.4 Ángulo de incidencia de los rayos solares en el ecuador en época de equinoccios.

El cambio en el Ángulo de incidencia de los rayos solares es el que provoca las estaciones en la Tierra (verano, otoño, invierno, primavera), en la figura A.3 podemos ver que para el hemisferio norte del globo terrestre entre junio y julio los rayos solares inciden casi perpendicularmente ( $0^\circ$  para un lugar sobre la Tierra en el hemisferio norte a una latitud de  $23,45^\circ$  en junio 21) lo que conlleva a un mayor calentamiento de la Tierra y sequias, a esta época se denomina Verano; mientras que en el mismo lugar el 21 de diciembre los rayos solares inciden sobre la superficie a un ángulo de  $23,45^\circ$  mas latitud. Por lo cual la perpendicularidad de los rayos solares disminuye; la radiación efectiva se reduce sustancialmente, generando poco calentamiento del hemisferio norte, clima más frio y heladas, a esta época se denomina invierno. El otoño y la primavera nacen en los equinoccios (22 de septiembre y 21 de marzo respectivamente), son épocas del año de transiciones, en que la Tierra viene de temperaturas muy bajas y pasan a altas temperaturas (primavera) y viceversa (otoño) [2].

En la tabla A.1 se tiene el valor del ángulo que forman los rayos solares con respecto a la perpendicular al plano de la superficie terrestre (ángulo cenit  $\theta_z$ ), en distintos lugares del globo terrestre para diferentes épocas del año al medio día solar [2].

	Tabla A.1 Ángulo cenital al medio día solar.			
	Solsticio de Invierno	Equinoccio de Primavera	Solsticio de Verano	Equinoccio de Otoño
<b>Ecuador</b>	23,45	0	-23,45	0
<b>Trópico de Capricornio</b>	0	-23,45	-46,9	-23,45
<b>Trópico de Cáncer</b>	46,9	23,45	0	23,45
<b>polo Sur</b>	-66,55	-90	-113,45	-90
<b>Polo Norte</b>	113,45	90	66,55	90

Se observa del ángulo cenit o cenital  $\theta_z$ , varía dependiendo de la latitud del lugar en estudio, por tanto la ecuación que describe el ángulo cenit a las 12 horas es:

$$\theta_z = L - \delta, \quad \delta = 23,45^\circ \sin\left(\frac{360}{365}(nd + 284)\right) \quad (A.5)$$

Donde  $L$  es la latitud del lugar que se define como la distancia angular entre el ecuador y un punto determinado del planeta, medida a lo largo del meridiano que pasa por ese punto;  $\delta$  es la declinación y  $nd$  es el número del día del año [2].

## ANEXO B. POSICIÓN SOLAR.

Para determinar la posición del Sol sobre nuestro cielo se debe estudiar 2 conceptos:

Ángulo Altura Solar  $H$ :

Ángulo entre la línea que desde el observador llega al Sol y la proyección de ella misma sobre la Tierra [2].

$$H = 90 - \theta_z \quad (B.1)$$

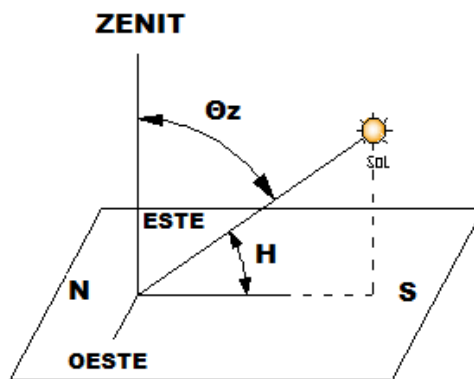


Figura B.1 Ángulo altura solar  $H$ , y ángulo Cenital  $\theta_z$ .

Ángulo Acimut o Acimutal  $A$ :

Ángulo entre la proyección al plano de la Tierra de la línea que une al Sol desde el observador y el eje Norte-Sur (Figura B.2).

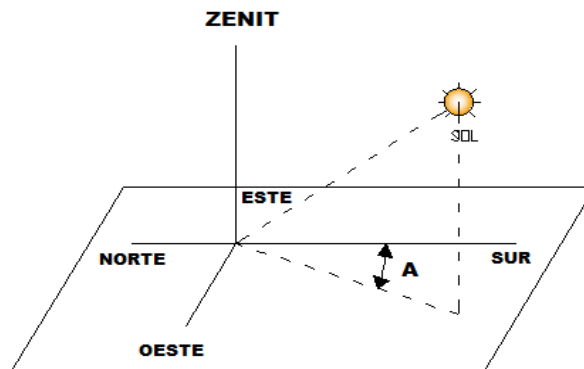


Figura B.2 Ángulo Acimut o Acimutal  $A$ .

Todos los días y para cualquier lugar a las 12 horas el acimut es 0°.

El Ángulo Cenital y Acimut es definido igual a [2]:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos \omega = \sin H, \omega = (nh - 12)15^\circ, nh = 1, 2 \dots 24. \quad (B.2)$$

$$\cos A = \frac{\cos \theta_z \sin L + \sin \delta}{\sin \theta_z \cos L} \quad (B.3)$$

### ANEXO C. CÁLCULO DE SOMBRAS.

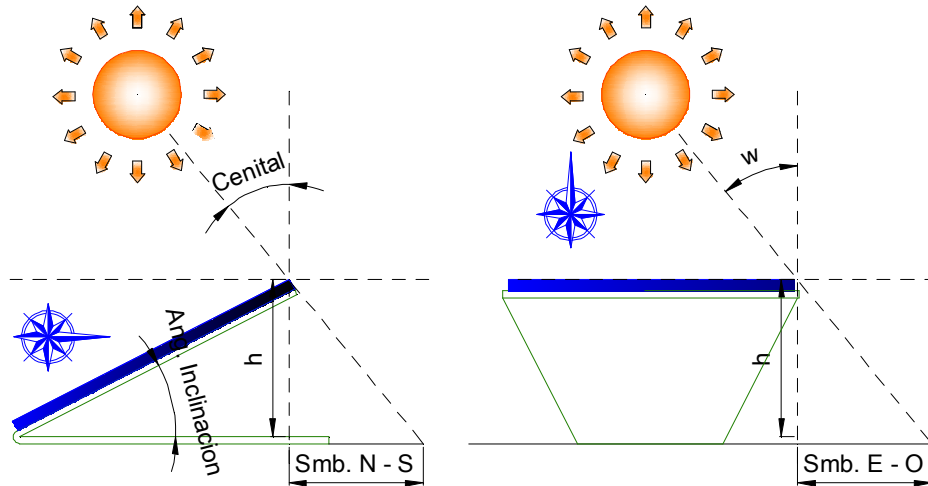


Figura C.1 Proyección de sombras.

La sombra o proyección de la sombra es causada por la altura solar  $H$ , en la dirección de norte a sur, y el ángulo horario en la dirección oriente occidente, depende del día y hora del año. Para calcular la proyección se analiza la figura C.1.

$$\text{Sombra Norte a Sur} = h \tan \theta_z \quad (C.1)$$

$$\text{Sombra Este a Oeste} = h \tan A \quad (C.3)$$

La sombra más extensa del año en el hemisferio norte se da el día 22 de diciembre en solsticio de invierno.

Calcule la sombra en Bucaramanga de norte a sur y de oriente a occidente el 22 diciembre a las 7 horas para una altura  $h$  de 1 metro.

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin \delta_{(356)} \sin L + \cos \delta_{(356)} \cos L \cos \omega_{(7)}) \quad (C.3)$$

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin 23,45 \sin 7,13 + \cos 23,45 \cos 7,13 \cos -75) = 73,44^\circ \quad (C.4)$$

$$\text{Sombra Norte a Sur} = h \tan \theta_z = 1 \tan 73,44^\circ = 3,363 \text{ [m]} \quad (C.5)$$

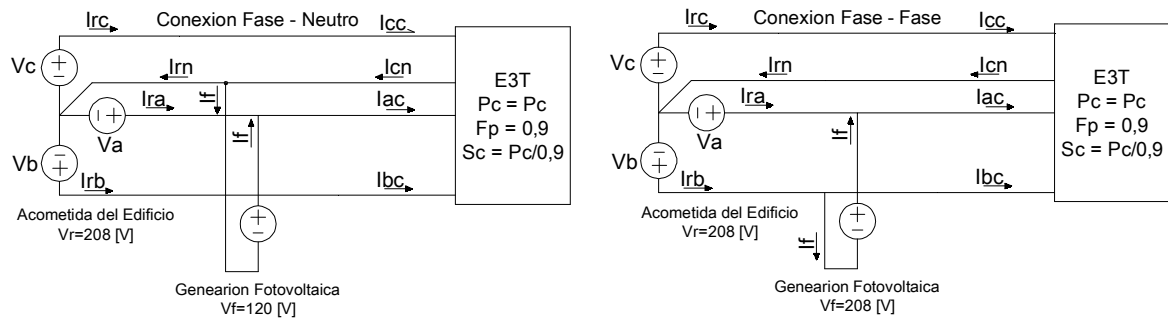
$$\omega = (nh - 12)15^\circ = (7 - 12)15^\circ = -75^\circ \quad (C.6)$$

$$\text{Sombra Este a Oeste} = h \tan \omega = 1 \tan 75^\circ = 3,732 \text{ [m]} \quad (C.7)$$

## ANEXO D. EFECTOS EN LA RED POR GENERACIÓN DESBALANCEADA.

Como se afecta la red al momento de conectar un inversor monofásico de conexión a la red, los casos posibles se aparecen en la figura D.1:

- Conexión Fase - Neutro.
- Conexión Fase – Fase.



**Figura D.1** Conexión Fase –Neutro, Conexión Fase – Fase.

**Análisis de conexión Fase - Neutro.**

$$Q_c = \sqrt{S_c^2 - P_c^2} \quad (D.1)$$

$$S_c = 3V_a \cdot I_{ca}^* \Rightarrow I_{ca} = \frac{1}{3} \left( \frac{S_c}{V_a} \right)^* \quad (D.2), \quad I_{cb} = \frac{1}{3} \left( \frac{S_c}{V_b} \right)^* \quad (D.3), \quad I_{cc} = \frac{1}{3} \left( \frac{S_c}{V_c} \right)^* \quad (D.4)$$

$$I_{ca} + I_{cb} + I_{cc} = I_{cn} \Rightarrow I_{cn} = 0 \quad (D.5)$$

$$P_f = V_a \cdot I_f^* \Rightarrow I_f = \left( \frac{P_f}{V_a} \right)^* \quad (D.6)$$

$$I_{ar} = I_{ac} - I_f, \xrightarrow{\text{realizando los calculos}} |I_{ra}| = \frac{\sqrt{(P_c - 3P_f)^2 + Q_c^2}}{3|V_a|} \quad (D.7)$$

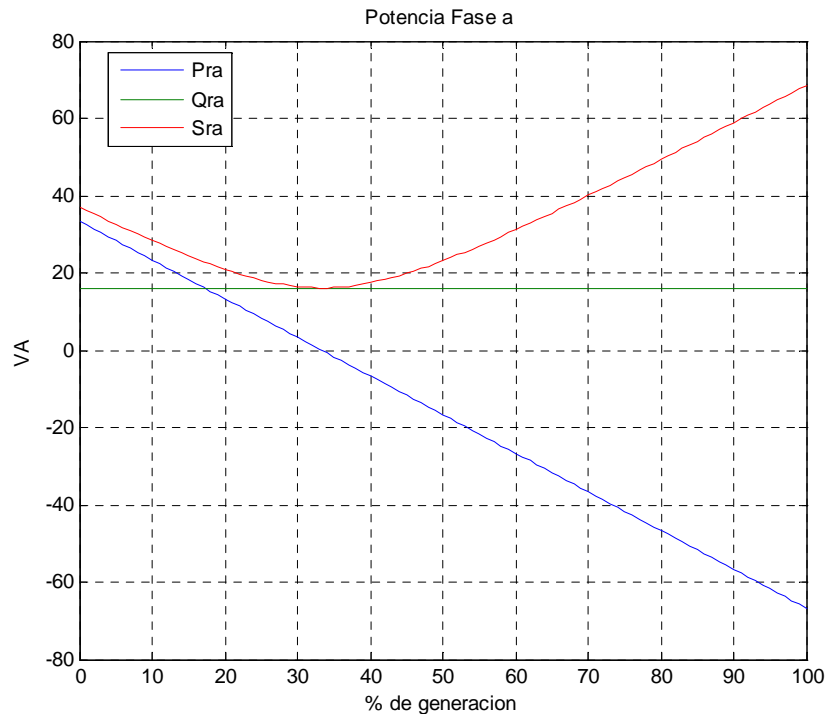
$$I_{rb} = I_{cb}, \xrightarrow{\text{realizando los calculos}} |I_{rb}| = \frac{|S_c|}{3|V_b|} \quad (D.8)$$

$$I_{rc} = I_{cc}, \xrightarrow{\text{realizando los calculos}} |I_{rc}| = \frac{|S_c|}{3|V_c|} \quad (D.9)$$

$$I_{rn} = I_{cn} - I_f, \xrightarrow{\text{realizando los calculos}} |I_{rn}| = \frac{|P_f|}{|V_a|} \quad (D.10)$$

$$S_{ra} = V_a \cdot I_{ra}^* \quad (D.11), \quad S_{rb} = V_b \cdot I_{rb}^* \quad (D.12), \quad S_{rc} = V_c \cdot I_{rc}^* \quad (D.13)$$

Las conexión afecta la potencia de la fase **a**, corrientes de línea de la fase **a** y **neutro**, se puede apreciar en la figura D.2, al generar más del 33% de la potencia de la carga, las fase **a**, comienza a entregar energía a la red, esto también hace de la potencia de dimensionamiento crezca nuevamente.



**Figura D.2** Potencia fase a, conexión Fase –Neutro.

Análisis de conexión Fase - Fase.

$$Q_c = \sqrt{S_c^2 - P_c^2} \quad (D.14)$$

$$S_c = 3 * V_a * I_{ca}^* \Rightarrow I_{ca} = \frac{1}{3} \left( \frac{S_c}{V_a} \right)^*, I_{cb} = \frac{1}{3} \left( \frac{S_c}{V_b} \right)^*, I_{cc} = \frac{1}{3} \left( \frac{S_c}{V_c} \right)^* \quad (D.15)$$

$$I_{ca} + I_{cb} + I_{cc} = I_{cn} \Rightarrow I_{cn} = 0 \quad (D.16)$$

$$P_f = V_a \cdot I_f^* \Rightarrow I_f = \left( \frac{P_f}{V_{ab}} \right)^* \quad (D.17)$$

$$I_{ar} = I_{ac} - I_f, \xrightarrow{\text{realizando los calculos}} |I_{ra}| = \frac{\sqrt{\left(P_c - \frac{3}{2}P_f\right)^2 + \left(Q_c - \frac{3}{2}P_f\right)^2}}{3|V_a|} \quad (D.18)$$

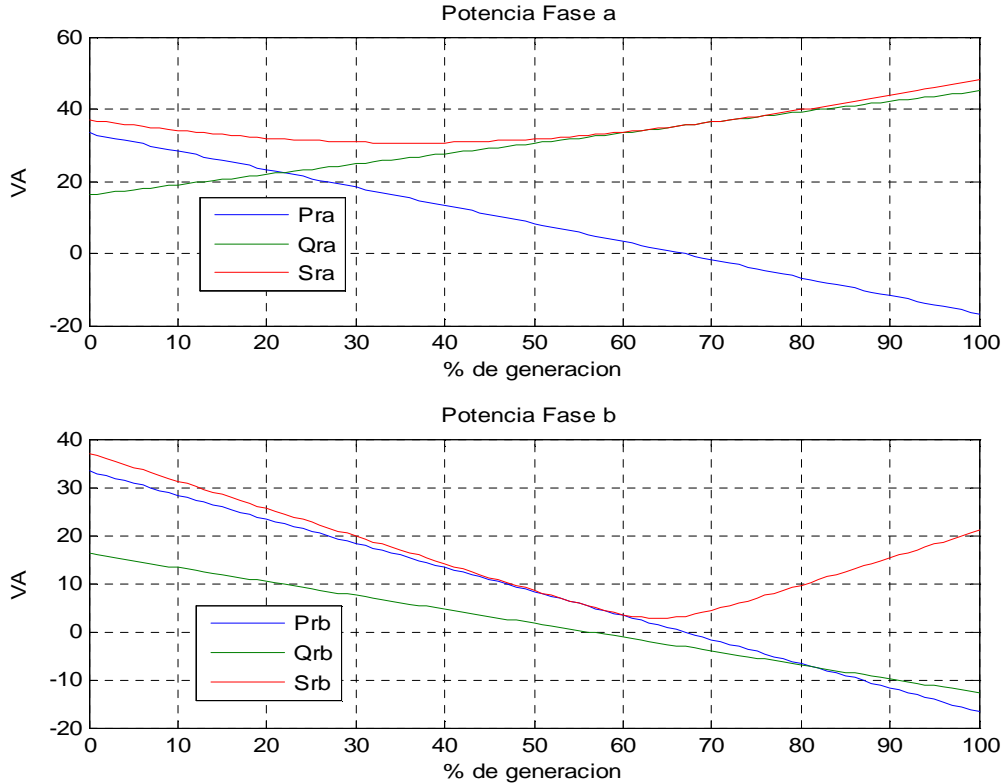
$$I_{rb} = I_{cb} + I_f, \xrightarrow{\text{realizando los calculos}} |I_{rb}| = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{2}P_c + \frac{\sqrt{3}}{2}Q_c - \frac{3}{2}P_f\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}P_c - \frac{1}{2}Q_c - \frac{\sqrt{3}}{2}P_f\right)^2}}{3|V_b|} \quad (D.19)$$

$$I_{rc} = I_{rc}, \xrightarrow{\text{realizando los calculos}} |I_{rv}| = \frac{|S_c|}{3|V_c|} \quad (D.20)$$

$$I_{rn} = I_{cn} \xrightarrow{\text{realizando los calculos}} |I_{rn}| = 0 \quad (D.21)$$

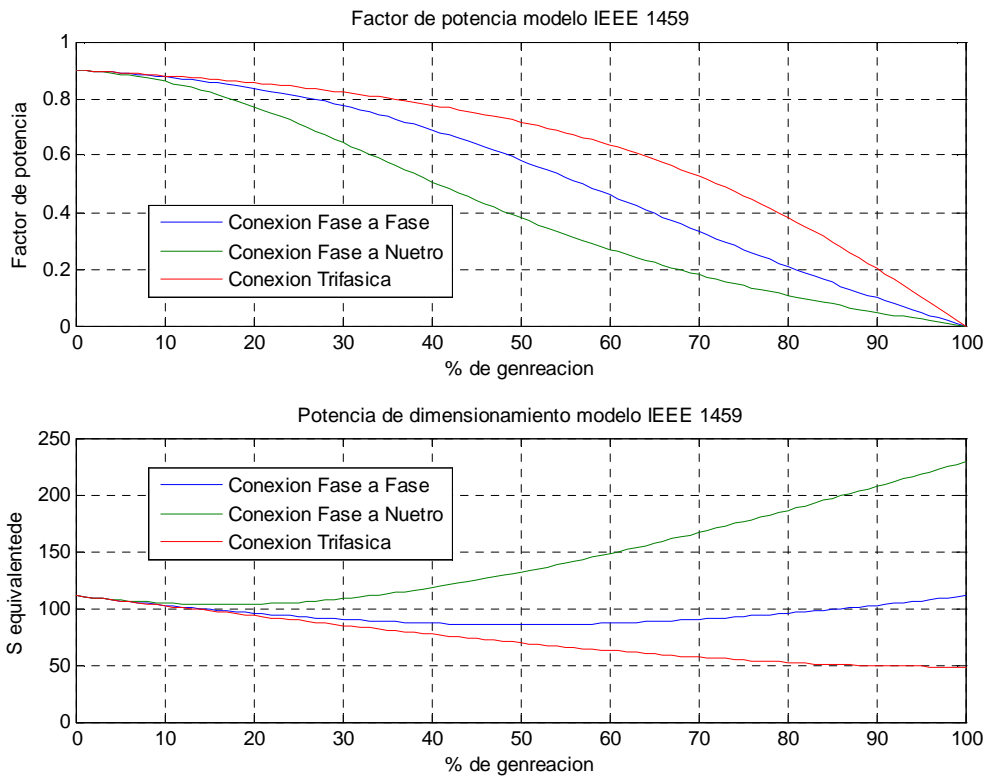
$$S_{ra} = V_a \cdot I_{ra}^* \quad (D.22), \quad S_{rb} = V_b \cdot I_{rb}^* \quad (D.23), \quad S_{rc} = V_c \cdot I_{rc}^* \quad (D.24)$$

Las conexión afecta la potencia de la fase **a**, fase **b**, corrientes de línea de la fase **a** y **b**, se observa en la figura D.3 cómo al generar más del 66% de la potencia de la carga, las fase **a** y **b**, comienzan a entregar energía a la red, además la potencia reactiva en la fase **a** comienza a crecer, a la misma velocidad en la que la potencia reactiva de la fase **b** disminuye.



**Figura D.3** Potencia fase **a**, fase **b**, conexión Fase – Fase.

Al graficar la potencia de dimensionamiento equivalente y factor de potencia equivalente del modelo IEEE 1459, para las conexiones Fase –Neutro, Fase- Fase y trifásica (Figura D.4). Se observa en los tres casos; los factores de potencia convergen al mismo valor, aunque el recorrido de la curva es más favorable la conexión trifásica, seguida de la conexión Fase – Fase. La conexión Fase – neutro hace crecer la potencia de dimensionamiento drásticamente. Si la generación no es apreciable con respecto a la carga, las tres conexiones se comportan de manera similar.

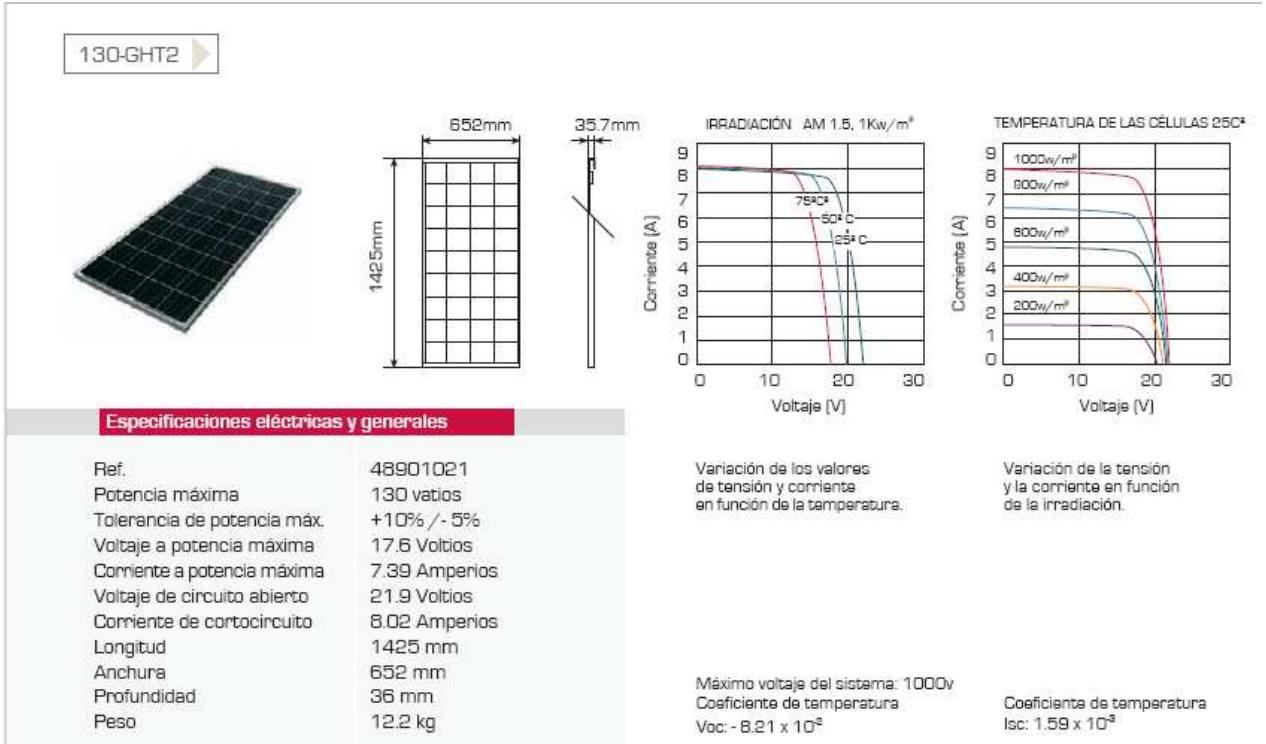


**Figura D.4** Grafica de las potencia de dimensionamiento y factor de potencia modelo IEEE 1459

## ANEXO F. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS.

### Especificaciones técnicas panel Kyocera 130-GHT2 serie KC

#### ► Especificaciones técnicas



## Especificaciones técnicas inversor Solectrica PVI 4000

### INVERTER SPECIFICATIONS

	PVI 3000	PVI 4000	PVI 5000	PVI 5300
--	----------	----------	----------	----------

#### Input

Continuous Power @240 VAC @208 VAC	3050W 2840W	4100W 3580W	5150W 4520W	5575W 4840W
Recommended Max. PV @240 VAC Array Power, STC Rating @208 VAC	3600W 3400W	4900W 4300W	6200W 5400W	6700W 5800W
MPPT Voltage Range	200V-550 VDC	200V-550 VDC	200V-550 VDC	200V-550 VDC
Maximum Input Voltage	600 VDC	600 VDC	600 VDC	600 VDC
Strike Voltage	235 VDC	235 VDC	235 VDC	235 VDC
Maximum Input Current	16 A	20 A	25 A	25 A
Maximum Short Circuit Current	24 A	24 A	30 A	30 A
Fused Inputs	3	4	4	4

#### Output

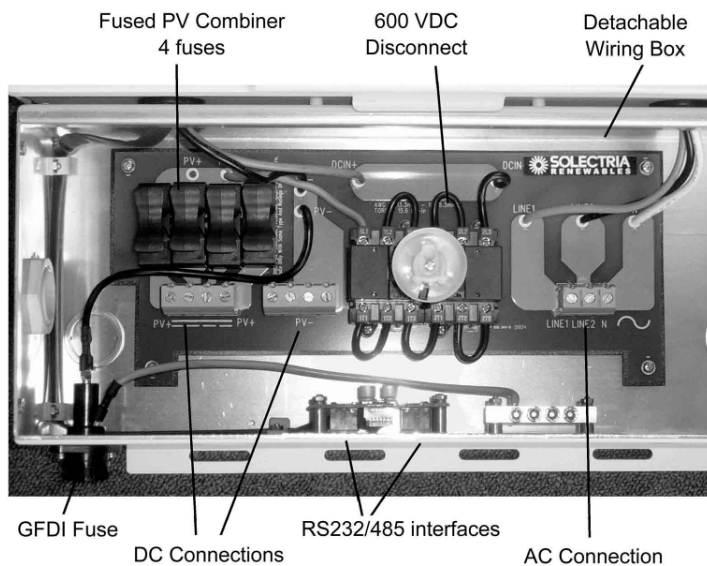
Continuous Power @240 VAC @208 VAC	2900W 2700W	3900W 3400W	4900W 4300W	5300W 4600W
Voltage Range @240 VAC @208 VAC	212-264 VAC 184-228 VAC	212-264 VAC 184-228 VAC	212-264 VAC 184-228 VAC	212-264 VAC 184-228 VAC
Frequency	60Hz Range: 59.3-60.5Hz	60Hz Range: 59.3-60.5Hz	60Hz Range: 59.3-60.5Hz	60Hz Range: 59.3-60.5Hz
Continuous Current	13 A	16.3 A	20.7 A	22.1 A
Output Current Protection Required	20 A	25 A	30 A	30 A
Max. Backfeed Current	0 A	0 A	0 A	0 A
Power Factor	Utility, >99%	Utility, >99%	Utility, >99%	Utility, >99%
THD	<3%	<3%	<3%	<3%
Efficiency Peak @240 VAC @208 VAC	96.7 96.4	96.7 96.5	96.7 96.4	96.6 96.3
CEC Efficiency @240 VAC @208 VAC	96.0 95.5	96.0 95.5	96.0 96.0	96.0 95.5

#### General

Enclosure	Rainproof, NEMA 3R			
Housing Material	Painted aluminum			
Ambient Temperature Range	-25°C to +55°C			
Cooling	Convection		Convection and fan assist	
Weight	47 lb (21.4 kg)	48 lb (21.8 kg)	58.5 lb (26.6 kg)	60 lb (27.4 kg)
Size (L x W x H)	29.75 in x 17.75 in x 6.75 in (741mm x 454mm x 175mm)		29.75 in x 17.75 in x 8.27 in (741mm x 454mm x 210mm)	
Wire Sizes	12 to 6 AWG input and output connections			
Standards	UL1741/IEEE1547, IEEEE1547.1, ANSI62.41.2, FCC part 15 B			
Warranty	10 years standard			

### INDUSTRY LEADING FEATURES

- Highest efficiency transformer isolated inverters in the industry, 96% CEC, full line!
- Fully integrated with DC disconnect, 3 or 4 fuse combiner and detachable DC wiring box.
- Widest DC voltage range, 200-600 VDC.
- Easy installation with low weight (47-60 lb) with quick-mount bracket feature, and universal 240/208 VAC operation.
- High reliability, 10 year warranty and certification to latest UL1741/IEEE1547.
- Free PC software and both RS232&485 communication ports.
- SolrenView or Fat Spaniel Inverter-Direct Internet, and/or revenue-grade monitoring options available. Also compatible with Energy Recommerce, Draker and others.
- Optional integrated panel assemblies with kWh meter and/or AC disconnect.



Lawrence, Massachusetts  
USA  
Ph: 978.683.9700 (MA)  
Ph: 562.608.8913 (CA)  
Fax: 978.683.9702  
E-mail: [inverters@solren.com](mailto:inverters@solren.com)  
[www.solren.com](http://www.solren.com)