



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA INDUSTRIA
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Mon
621.47
P896
2012**

TITULO

Despacho de Potencia y Energía en función de la radiación solar
anual disponible para la Planta Solar Fotovoltaica de 900kW ubicada
en La Trinidad, Diriamba

AUTOR

Br. Osiris de los Ángeles Prado Mejía

TUTOR

Dr. Ing. Fernando Sánchez Cuadra

Managua, 09 de Enero de 2012

Dedicatoria

A Dios, por las personas que puso en mi camino.

A mi madre, por su apoyo en mis años de estudios.

A mi profesor guía Fernando Sánchez, por su orientación para el desarrollo de la presente.

A todas las personas que trabajan en el Ministerio de Energía y Minas en especial a la Dirección General de Políticas y Planificación Energética que me brindaron ayuda y asesoría para la elaboración de esta monografía.

Finalmente a todas las personas que se cruzaron en este camino y que me dieron palabras de aliento y apoyo.

Agradecimiento

Agradezco a mi entorno que me dio las facultades para pensar en mi futuro y sobre todo a mi madre, que si no fuera por su sacrificio no estaría en estos momentos.

No tengo letras para seguir diciendo el gran regocijo que me da poder terminar esta carrera en donde profesores y compañeros dejan parte de su vida, para dar vida a las ilusiones de niña y que hoy en día se hacen realidad.

Solo sé que este camino es apenas el comienzo de una gran historia de virtudes y gracias para mí.

Índice

1.Introducción.	1
2. Objetivos.	2
2.1. Objetivo General.	2
2.2. Objetivos Específicos.	2
3. Justificación.	3
4. Hipótesis y Variables.	4
4.1. Hipótesis de Investigación.	4
4.2. Hipótesis Nula.	4
4.3. Hipótesis Alternativa.	4
5. Antecedentes.	5
6. Marco Teórico.	7
6.1. La energía solar.	7
6.2. El sol.	7
6.2.1 La radiación solar.	8
6.2.2.Distribución Espectral de la Radiación Solar.	8
6.2.3. Radiación Solar en Nicaragua.	10
7. Aprovechamiento y Aplicaciones de la energía solar.	13
7.1. Energía solar térmica pasiva.	14
7.2. Energía solar térmica activa.	15
8. Energía Solar Térmica o Calórica.	21
8.1. Colectores Solares Térmicos.	21
8.1.1. Colector Solar de Placa Plana.	21
8.1.2. Concentrador Solar.	22
8.1.3. Torre Solar.	22
9. Energía Fotovoltaica.	24
9.1. El Panel Fotovoltaico.	25
9.2. El Sistema Fotovoltaico.	26

9.3. Funcionamiento del Sistema Fotovoltaico.	27
9.4. Ventajas y Desventajas de las instalaciones fotovoltaica.	28
9.5. El Desarrollo Fotovoltaico Mundial.	29
9.6. Instalación Fotovoltaica Conectada a la Red.	30
9.7. Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red.	30
9.7.1. Características del Sistema Fotovoltaico.	31
9.7.2. Configuración Típica de un Sistema Conectado a la Red.	33
9.7.3. Panorama Mundial de la Conexión a Red.	34
10. Planta Solar Fotovoltaica de 900 KW en La Trinidad.	36
10.1. Descripción Técnica y Conformación General del Proyecto.	36
10.2. Ubicación.	38
10.3. Datos Técnicos.	40
10.4. Aspectos Ambientales.	41
10.5. Costo de la Inversión y Costo de la Operación.	41
10.6. Beneficios del Proyecto.	44
11. Cálculos Asociados a la Potencia y Energía.	46
12. Operación de la Planta Solar Fotovoltaica en la red eléctrica nacional.	71
12.1. Despacho de carga y de potencia de un Sistema Eléctrico.	71
13. Conclusiones.	73
14. Recomendaciones.	76
15. Bibliografía.	78

1. INTRODUCCIÓN

Este estudio pretende estimar las proyecciones de energía y potencia de una planta solar fotovoltaica de 900kW a ser instalada en la comunidad de La Trinidad, en el Municipio de Diriamba, Departamento de Carazo.

Para tal efecto se utilizarán los datos técnicos de potencia de la planta y los datos de radiación solar en la zona de ubicación de la planta. Las estimaciones se realizarán para periodos horarios, semanales, mensuales y anuales, en vista que la radiación solar varía a lo largo del tiempo considerado.

Así mismo se analizarán las implicaciones que tendrá la inserción de esta planta en el Sistema de Interconectado Nacional (SIN) y el ahorro en fuel oíl que representará está generación para el país.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Realizar proyecciones de generación de potencia y energía de la planta solar fotovoltaica de 900 kW a estar ubicada en La Trinidad, Diriamba.

2.2. Objetivos Específicos

- i. Conocer y estudiar las características técnicas de la planta solar fotovoltaica, en base a los datos de radiación solar en la zona de ubicación.
- ii. Estimar y calcular los valores de energía y potencia que la planta eléctrica entregará por hora, día, mes y año.
- iii. Analizar las implicaciones que tendrá la interconexión de esta planta eléctrica al Sistema Interconectado Nacional (SIN).
- iv. Analizar el comportamiento operativo de la planta eléctrica bajo condiciones de isla.
- v. Estimar el ahorro de combustible que esta planta eléctrica representa para el país.

3. JUSTIFICACIÓN

Con la estimación de las proyecciones de energía y potencia en función de la radiación solar local del tiempo considerado (hora, semana, mes, año) se pondrá a disposición del Centro Nacional de Despacho de Carga una herramienta que permita planificar el despacho de esta planta dentro del Sistema de Interconectado Nacional (SIN). También se tendrá a mano un instrumento de planificación de la operación de la planta eléctrica bajo condiciones de “isla”.

Así mismo, esta planta eléctrica solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica nacional, contribuirá a reducir el consumo de combustibles fósiles para generación eléctrica, con la cual se ahorrarán divisas al país.

4. HIPÓTESIS Y VARIABLES

4.1. Hipótesis de Investigación

Conociendo la disponibilidad de la fuente de energía solar durante el día, se puede optimizar la operación de la planta solar fotovoltaica ubicada en Diriamba, dentro del Sistema Interconectado Nacional (SIN).

4.2. Hipótesis Nula

La operación de la planta eléctrica solar fotovoltaica no tendrá ningún riesgo para el Sistema Interconectado Nacional (SIN), en caso de fallas que obliguen a ponerla fuera de servicio.

4.3. Hipótesis Alternativa

La operación de la planta eléctrica solar fotovoltaica ubicada en La Trinidad, Diriamba, es confiable y segura bajo las condiciones de un sistema aislado

5. ANTECEDENTES

En Nicaragua, la energía solar fotovoltaica se ha desarrollado a muy pequeña escala, principalmente en las zonas rurales, a través de paneles solares individuales y sistemas solares comunitarios, y a mayor escala, por medio de un proyecto piloto, ubicado en el edificio central del ejecutivo del Ministerio de Energía y Minas (MEM) en la zona urbana de Managua.

Los paneles solares individuales instalados en las zonas rurales constan de: panel solar, controlador de carga, inversor, accesorios (interruptor, toma corrientes, etc.) y batería.

Durante el periodo 2007-2010 se instalaron 5,690 paneles solares individuales, en diferentes sitios rurales de Nicaragua, beneficiando a igual número de familias, desglosados de la siguiente manera:

<i>Año de instalación</i>	<i>Cantidad de Paneles solares individuales instalados</i>
2007	2,500
2008	2,841
2009	65
2010	284
Total	5,690

Los sistemas solares fotovoltaicos comunitarios, también instalados en zonas rurales, son de dos tipos: a) sistemas para cargar baterías y b) sistemas para abastecer con electricidad a centros comunitarios (escuelas).

Los sistemas para cargar batería constan de: panel solar, batería, controlador de carga, conductores, interruptor, inversor. El propósito es utilizar la luz solar para

cargar baterías individuales, propiedad de los pobladores de las comunidades, que luego las llevan a sus casas y las conectan a un sistema eléctrico domiciliario básico. Estos sistemas para carga de batería están ubicados en 7 localidades de la Región Autónoma Atlántico Norte (RAAN).

Los sistemas solares comunitarios se han instalado en diferentes municipios de la RAAN a través del programa EUROSOLAR, financiado por la Unión Europea. En Nicaragua el programa beneficia a 42 comunidades de los municipios de Siuna, Rosita, Bonanza Prinzapolca, Waspán y Puerto Cabezas. Estos sistemas solares comunitarios están ubicados en escuelas y proporcionan a cada comunidad, electricidad básica para servicios de telefonía, internet, refrigeración para vacunas, purificación de agua, impresión y fotocopias. De esta manera se beneficia a 62,000 personas.

6. LA ENERGÍA SOLAR

6.1. El Sol

El sol es la fuente primaria de la energía solar, la cual es considerada como energía renovable del grupo no contaminante, conocida también como energía limpia o energía verde.

La energía solar es generada por la fusión nuclear, fuente de energía de las estrellas del universo.

El sol es la estrella más cercana a la tierra y está catalogada como una estrella enana amarilla. Sus regiones interiores son totalmente inaccesibles a la observación directa y es allí donde se alcanzan temperaturas de hasta 20 millones de grados centígrados, como resultado de fusiones nucleares, que generan su energía.

La capa más externa del sol, la fotosfera, es la que produce casi toda la radiación observada y tiene una temperatura de 6,000 K. Tiene solamente una anchura entre 200 y 300 km. Por encima de ella está la cromosfera con una anchura de unos 15,000 km. Más exterior aún se encuentra la corona solar, una parte muy tenue y caliente que se extiende varios millones de kilómetros y que solo es visible durante los eclipses solares totales.

En el sol aparecen fenómenos cíclicos que conforman la actividad solar como las manchas solares, fáculas, protuberancias solares, etc. Estos procesos que tienen lugar a diferentes profundidades, van acompañados siempre de una emisión de energía que se superpone a la principal emisión de la fotosfera. Por lo tanto, la emisión del sol no es igual cuando el sol está en calma que activo.

También la cromosfera y corona absorben y emiten radiación que se superpone a la principal fuente que es la fotosfera.

6.2. La Energía Solar

6.2.1. La Radiación Solar

La radiación solar es la energía radiante producida en el sol como resultado de reacciones nucleares de fusión del hidrógeno (en átomos de helio) contenido en el sol. Llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre.

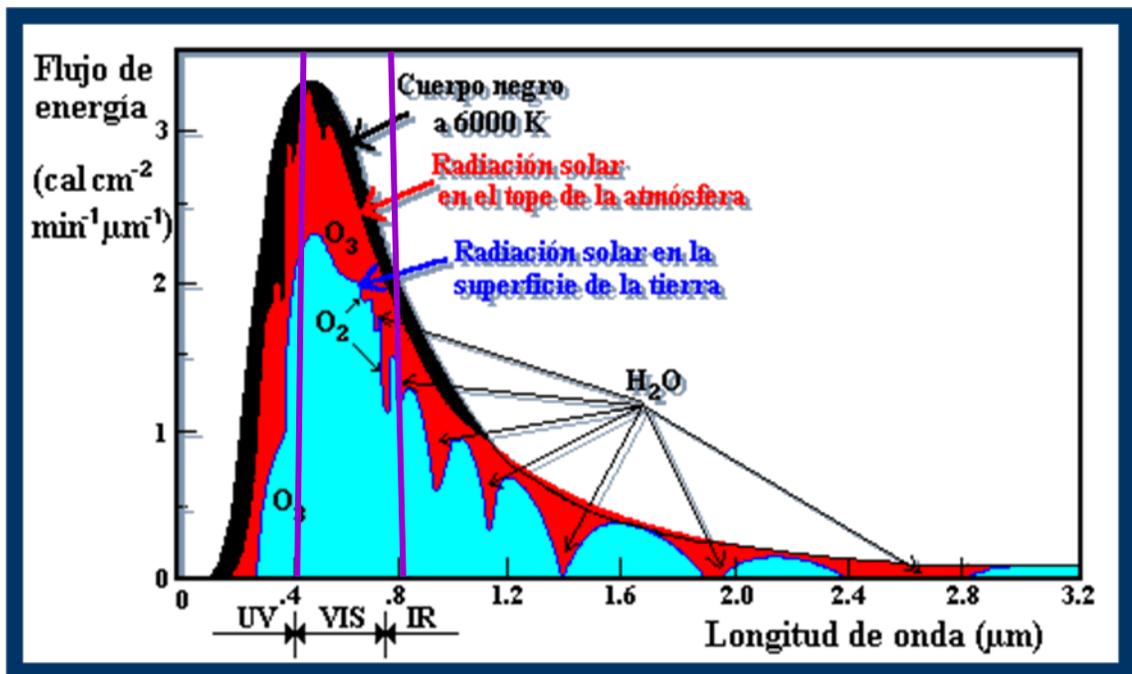
La intensidad de radiación solar real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar debido a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera. La radiación solar que llega a la tierra no es uniforme y los factores de los cuales depende son: la hora del día, la latitud del lugar, la orientación de la superficie receptora y por otro lado las condiciones climatológicas. Los primeros factores son perfectamente calculables, pero las condiciones climáticas son solo predecibles en términos estadísticos.

6.2.2. Distribución Espectral de la Radiación Solar

La aplicación de la Ley de Planck al sol nos indica que el 99% de la radiación solar emitida está en las longitudes de onda entre 0.15 a 4 micrómetros (micras) o bien 1,500 a 4,000 Å (Angstrom). La luz visible se extiende de 4,000 a 7,000 Å. La radiación ultravioleta u onda corta se encuentra en el rango de 1,500 a 4,000 Å y la radiación infrarroja u onda larga de 0.74 a 4 micras.

La atmósfera de la tierra constituye un importante filtro que hace inobservable las radiaciones de longitud de onda inferior a las 0.29 micras por la fuerte absorción del ozono y oxígeno. Esto nos libra de la radiación ultravioleta, peligrosa para la salud. La atmósfera es opaca a toda radiación infrarroja de longitud de onda superior a las 24 micras, lo que no afecta la radiación solar en sí, pero sí a la energía emitida por la tierra que llega a 40 micras y que es absorbida. A este efecto se conoce como efecto invernadero.

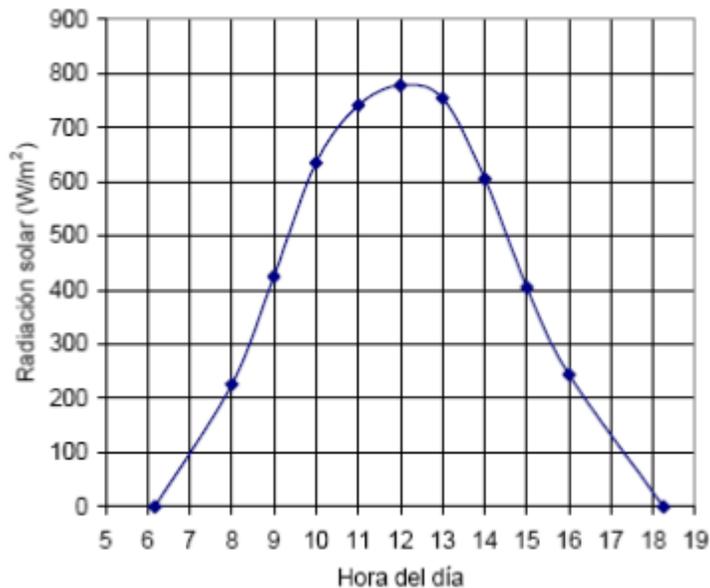
Pero la emisión de la radiación solar difiere de la de un cuerpo negro sobre todo en el ultravioleta. En el infrarrojo y en el visible se corresponde mejor con la temperatura de un cuerpo negro de 5,779 °C. Esto nos indica que la radiación solar no se produce en las mismas capas (ver Gráfica 1).



Gráfica 1. Espectro de la radiación solar.

6.2.3. Radiación Solar en Nicaragua

Es importante indicar que Nicaragua cuenta con un recurso solar abundante teniéndose el máximo aprovechamiento del recurso de las 9:00 am a las 3:00 p.m. Este recurso ha sido estudiado durante un periodo de 22 años por el Padre Julio López de la Fuente, Catedrático e Investigador de la Universidad Centroamericana, habiendo obtenido de todos estos estudios una curva característica para la Radiación Solar. A continuación se muestra la Gráfica típica de la Radiación Solar Instantánea para nuestro país.



Gráfica 2. Típica de la Radiación Solar Instantánea

Tal como se observa en la Gráfica 2 de la Radiación Solar Instantánea Típica, existe un potencial de energía aprovechable en determinadas horas del día, que puede ser utilizado como fuente de generación renovable, ya sea para generar electricidad, o bien para otros usos.

Así mismo, en la siguiente Tabla 1 se muestra la radiación solar en ciertas comunidades del territorio nacional.

DATOS DE RADIACION SOLAR (Whr/m ² -día)													
POBLADO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
San Carlos	4.3	4.95	5.7	5.5	4.98	4.3	3.85	4.2	4.4	4.3	4.1	3	4.47
El Rama	4	4.95	5.7	5.7	4.97	4.4	3.85	4.2	4.4	4.3	4.1	3.8	4.53
Villa Sandino	4.6	4.95	5.7	5.85	5.05	4.5	3.85	4.2	4.6	4.7	4.5	4.1	4.72
Juigalpa	4.9	5.25	6	5.85	5.2	4.7	4.55	4.8	5	4.9	4.7	4.4	5.02
Rivas	5.5	6.15	6.6	6.15	5.35	4.9	4.9	5	5	4.9	4.7	4.7	5.32
Masatepe	5.5	5.85	6.3	6.15	5.35	5	4.9	5.2	5.2	4.9	4.7	4.7	5.31
Managua	5.2	5.85	6.3	6.15	5.43	5	4.9	5.4	5.2	4.9	4.7	4.7	5.31
Nagarote	5.2	5.85	6.3	6	5.35	5.1	5.25	5.4	5	4.9	4.7	4.7	5.31
Chinandega	5.2	5.85	6.3	5.85	5.35	5.1	5.25	5.4	4.8	5	4.7	4.7	5.29
Ocotal	4.6	5.25	5.7	5.85	5.28	5.2	4.9	5.4	5.2	4.9	4.5	4.4	5.1
Jinotega	4.9	5.25	6	5.85	5.28	5	4.9	5.4	5.2	4.9	4.7	4.7	5.17
Muy Muy	4.6	5.25	6	5.7	5.13	4.7	4.55	5	5	4.7	4.5	4.4	4.96
Siuna	4	4.65	5.1	5.4	4.98	4.4	3.85	4.2	4.2	4.1	3.9	3.8	4.38
Pto. Cabezas	3.7	4.65	5.1	5.55	4.9	4.4	4.2	4.4	4.4	4.1	3.9	3.8	4.43
Bluffiells	4	4.95	5.7	5.85	5.05	4.4	4.2	4.4	4.4	4.3	4.1	3.8	4.6
Granada	5.2	5.85	6.3	6.15	5.35	4.8	4.9	5.2	5.2	4.9	4.7	4.7	5.27
Malacatoya	4.9	5.55	6.3	6	5.35	4.8	4.9	5.2	5.2	4.9	4.7	4.7	5.21
Morrito	4.6	5.25	6	5.85	5.2	4.5	4.2	4.4	4.8	4.7	4.5	4.1	4.84
Cardenas	5.2	5.85	6.3	6.15	5.28	4.7	4.9	4.8	4.8	4.7	4.5	4.7	5.16
Punta Gorda	4	4.95	5.7	5.85	5.05	4.3	4.2	4.4	4.4	4.3	4.1	3.8	4.59
Monkey Point	4	4.95	5.7	5.7	5.05	4.4	4.2	4.4	4.4	4.1	3.9	3.8	4.55
Puerto Isabel	4	4.55	5.4	5.55	5.05	4.4	4.2	4.4	4.4	4.1	3.9	3.8	4.48
Sandy Bay	3.7	4.65	5.1	5.55	4.98	4.4	4.2	4.4	4.4	4.1	3.9	3.8	4.43

Fuente UCA-Estación VASTENA

Tabla 1. Incidencia de radiación solar en ciertas comunidades del territorio de Nicaragua.

Fuente: Julio López de la Fuente S. J. Registro, análisis y correlaciones climático-solar-tropicales 1983-2008, Managua Nicaragua

En la siguiente Figura 1 se muestra el Mapa Solar de Nicaragua, donde los colores más intensos (rojo, naranja) indican la mayor cantidad de radiación solar en el territorio nacional.

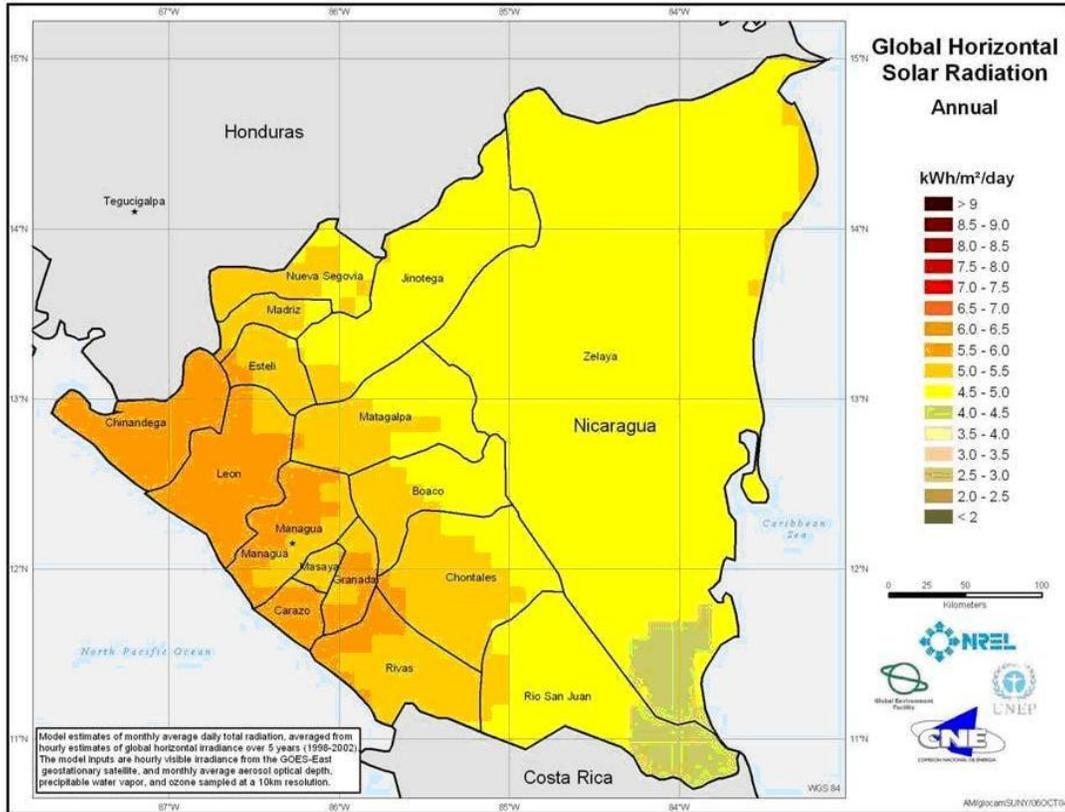


Figura 1. Mapa Radiación Solar de Nicaragua

7. APROVECHAMIENTO Y APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR

La energía solar es la fuente principal de vida en la Tierra, dirigiendo los ciclos biofísicos, geofísicos y químicos que mantienen la vida en el planeta, los ciclos del oxígeno, del agua, del carbono y del clima. El Sol nos suministra alimentos mediante la fotosíntesis, y como es la energía del sol la que induce el movimiento del viento y del agua y el crecimiento de las plantas, la energía solar es el origen de la mayoría de fuentes de energía renovables, tanto de la energía eólica, la hidroeléctrica, la biomasa, la de las olas y corrientes marinas, así como la energía solar propiamente dicha.

Las aplicaciones de la energía solar térmica son muy amplias y cada día se avanza más en este sentido, teniendo presente que nos enfrentamos a un grave problema, que es el cambio climático. Además, está claro que la energía solar es gratuita e inagotable.

Entre las múltiples aplicaciones de la energía solar se encuentran su aprovechamiento como fuente de calor, como luz directa y en la generación de electricidad principalmente.

Como fuente de calor, éste puede ser recogido en colectores líquidos o de gas que son expuestos a la radiación solar absorbiendo su calor y transmitiéndolo al fluido utilizado.

Este calor acumulado se puede utilizar directamente o puede ser empleado para la generación de electricidad. Esta diferencia en el proceso nos permite distinguir entre los dos tipos de Energía Solar Térmica, la activa y la pasiva, dependiendo de si utilizan o no elementos mecánicos para conseguir el efecto térmico.

7.1 Energía solar térmica pasiva

La energía solar térmica pasiva nos permite producir energía sin necesidad de utilizar ningún medio mecánico. El proceso térmico pasivo es un proceso totalmente natural en el que el sol se emplea para el calentamiento del agua circulante por conductos o placas que posteriormente es utilizada para la climatización de ambientes o el agua caliente sanitaria, tanto a nivel doméstico como industrial. El agua caliente se aprovecha directamente o se almacena en un depósito para su posterior uso (Ver Figura 2).

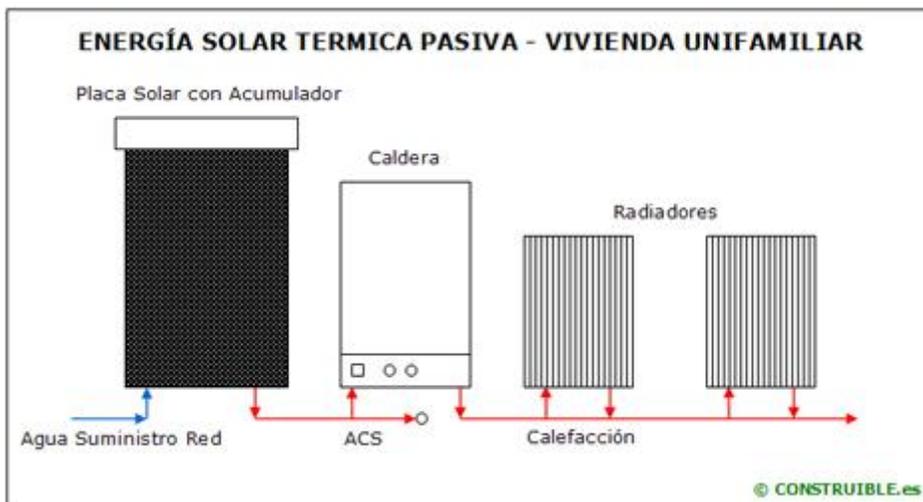


Figura2.Energía solar térmica pasiva-vivienda unifamiliar.

La energía solar térmica es uno de los pilares de la Arquitectura Bioclimática que utiliza los recursos solares combinados con parámetros de diseño y elección de materiales para conseguir el máximo confort ambiental con el menor consumo de energía. Se aprovecha la energía solar mediante la adecuada ubicación, diseño y orientación de los edificios, empleando correctamente las propiedades fisicoquímicas de los materiales y los elementos arquitectónicos de los mismos: aislamientos, la utilización de elementos constructivos como ventanas orientadas al sur, paredes de mampostería y solanas para recibir y almacenar la energía solar. tipo de cubiertas, protecciones, etc.

En el horizonte del año 2010 se proyecta duplicar la utilización de la energía solar pasiva y se sigue investigando a todos los niveles para su futuro desarrollo y aplicación en los edificios. Entre las principales aplicaciones están la calefacción, el agua caliente sanitaria, la refrigeración, la climatización de piscinas, etc.

Entre otras aplicaciones de forma pasiva de la energía solar están su uso directamente como luz solar, por ejemplo, como iluminación; calor para el secado de granos básico, frutas, de ropa; para el calentamiento de agua y cocción de alimentos de manera directa en recipientes o a través de cocinas solares térmica; calor para purificar y pasteurizar el agua, etc.; también existen los captadores solares de aire (para calefacción), y otras aplicaciones térmicas.

7.2 Energía solar térmica activa

La energía solar térmica activa requiere del uso de dispositivos que son a menudo llamados sistemas solares activos e incluyen componentes manufacturados para tal fin. La energía solar se puede utilizar para producir calor, electricidad o frío.

Se puede generar electricidad a partir de la energía solar térmica, mediante las llamadas centrales de torreo mediante colectores cilindro-parabólicos, donde se calienta un fluido que transporta el calor y genera electricidad mediante una turbina y un alternador.

El funcionamiento consiste en concentrar la luz solar mediante espejos (helióstatos), cilindros o discos parabólicos para alcanzar altas temperaturas (más de 400 ° C), que se utilizan para generar vapor y activar una turbina que produce electricidad por medio de un alternador. En este proceso no se producen las emisiones contaminantes de las centrales térmicas convencionales. Existe la posibilidad de almacenar el calor solar recogido durante el día para que

durante la noche o cuando está nublado se pueda continuar generando electricidad.

La inversión que hay que hacer en este tipo de instalaciones es elevada y la técnica se encuentra en experimentación aunque se trabaja en su aplicación y desarrollo y existen ejemplos notables en España como el de la Plataforma Solar de Almería.

Sin embargo, la tecnología más utilizada para el aprovechamiento eléctrico de la energía solar es la que se deriva de las células fotovoltaicas.

A continuación se muestran algunas aplicaciones específicas de la energía solar activa:

- **Hornos solares.** Los hornos solares son una aplicación importante de los concentradores de alta temperatura. El mayor, situado en Odeillo, en la parte francesa de los Pirineos, tiene 9.600 reflectores con una superficie total de unos 1,900 m² para producir temperaturas de hasta 4,000 °C. Estos hornos son ideales para investigaciones, por ejemplo, en la investigación de materiales, que requieren temperaturas altas en entornos libres de contaminantes.
- **Enfriamiento solar.** Se puede producir frío con el uso de energía solar como fuente de calor en un ciclo de enfriamiento por absorción. Uno de los componentes de los sistemas estándar de enfriamiento por absorción, llamado generador, necesita una fuente de calor. En general, se requieren temperaturas superiores a 150 °C para que los dispositivos de absorción trabajen con eficacia, los colectores de concentración son más apropiados que los de placa plana.
- **Agua Caliente Sanitaria Solar (ACSS).** La mayor parte del área de colectores solares instalados se usa para producir agua caliente para

aplicaciones domésticas. Un sistema-tipo de ACSS para una sola vivienda familiar en se compone de un área de 3 a 6m² de colectores montados en la azotea y utiliza una bomba para circular el agua entre dichos colectores y el intercambiador de calor dentro del depósito/acumulador. La misma aplicación tiende a ser más reducida, de 2 a 4m² de área, y no incluye bomba de circulación al usar el método de circulación mediante termosifón. La mayoría de sistemas de ACSS disponen también, de un calentador convencional a fuel, gas, combustible sólido o electricidad como sistema de apoyo. Los sistemas de calentamiento de agua se instalan también en grandes proyectos como hospitales, hoteles y bloques de viviendas. Sus dificultades de diseño, optimización, verificación/monitorización y marketing han sido resueltas en gran medida y por eso se registra un considerable crecimiento en este segmento de mercado.

Actualmente en Nicaragua se cuenta con sistemas de calentamiento en varios hoteles (Hotel Estrella, Hotel Camino Real, Hotel Mansión Teodolinda) y hospitales (Hospital Aldo Chavarría, Hospital de Jinotepe).

- **Calentamiento de Espacio** El calentamiento solar activo del espacio se usa como apoyo a la calefacción convencional donde la necesidad de esta última es de larga duración. Sistemas combinados de calentamiento de agua y espacio son frecuentes en Austria y Alemania. La mayoría de ellos emplean un fluido transferidor caliente basado en el agua y un depósito de agua debidamente recubierto con aislamiento como almacén de calor. Algunos sistemas usan aire como fluido transferidor de calor. Los colectores de aire caliente se emplean de manera creciente en combinación con los sistemas de calentamiento de salas de conferencias, factorías y edificios de baja energía (o preparados para reducir el consumo energético) ya en la fase constructiva.

- **Calefacción.** Desde 1979 numerosas plantas de calefacción en distritos de Dinamarca, Suecia y Alemania se han reforzado con colectores solares. Colectores planos especialmente diseñados, con la misión de precalentar el agua antes de que entre en la cadera convencional.
- **Calentamiento de Piscinas.** Este método eleva la temperatura de la piscina unos pocos pero críticos grados a muy bajo costo, estando sobradamente acreditadas su confiabilidad y economía. Varios millares de piscinas europeas, principalmente en Alemania, Austria, Francia y Holanda están actualmente equipadas así. Los colectores solares más sencillos sin cubierta transparente se vienen utilizando para esta aplicación desde hace unos 20 años. Uno de los sistemas-tipo consiste en un absorbedor solar de plástico negro colocado en una azotea o en terreno próximo a la piscina y conectado con el filtro del circuito de agua de la misma.
- **Industria.** Los procesos industriales requieren calor en una gama amplia de temperaturas. Mientras que muchos tipos de colectores solares pueden ser aplicados para proporcionar calor de baja temperatura, los de tubo de vacío y otros paneles de alto rendimiento pueden emplearse eficientemente para producir temperaturas de 100°C y aún más altas.
- **Refrigeración Solar.** La refrigeración es una aplicación obvia de la energía solar, puesto que las épocas en que más se necesita suelen coincidir con las que disfrutan de más radiación solar. Por ejemplo, las cargas de refrigeración de la mayoría de los edificios con aire acondicionado son las mayores durante los días soleados del verano. Esta es una tecnología en la que se han registrado recientes avances, y sistemas solares de refrigeración se han instalado en edificios como hoteles. Un sistema tipo de esta clase usa la producción de temperaturas altas que aportan los colectores planos de alta eficiencia o los tubos de vacío para alimentar una bombade calor por absorción. Si bien todavía no

es usada ampliamente, la refrigeración solar tiene un enorme potencial de futuro.

- **Electricidad fotovoltaica.** Es la energía solar aprovechada por medio de celdas fotovoltaicas (celda solar, célula solar), capaces de convertir la luz solar en un potencial eléctrico, sin necesariamente pasar por un efecto térmico o mecánico. Para lograr esto la energía solar se recoge de una forma adecuada, a través de los llamados paneles o módulos fotovoltaicos.

Estas células están elaboradas a base de silicio SiO_2 (uno de los elementos más abundantes y componente principal de la arena) con adición de impurezas de ciertos elementos químicos (Boro y Fósforo), y son capaces de generar cada una corriente de 2 a 4 amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,48 Voltios, utilizando como fuente la radiación luminosa. Varias celdas fotovoltaicas conectadas en serie forman un panel fotovoltaico. La energía generada por estos paneles puede utilizarse para alimentar hogares, automóviles eléctricos o negocios. Las celdas también se utilizan individualmente para pequeñas máquinas, como calculadoras, reloj, juguetes y cualquier otro equipo que requiera conectarse a electricidad.

Las "células solares", dispuestas en paneles solares, ya producían electricidad en los primeros satélites espaciales. Actualmente se perfilan como la solución definitiva al problema de la electrificación rural, con clara ventaja sobre otras alternativas, pues, al carecer los paneles de partes móviles, resultan totalmente inalterables al paso del tiempo, no contaminan ni producen ningún ruido en absoluto, no consumen combustible y no necesitan mantenimiento. Además, y aunque con menos rendimiento, funcionan también en días nublados, puesto que captan la luz que se filtra a través de las nubes.

- **Aplicaciones agrícolas.** Las aplicaciones agrícolas son muy amplias con invernaderos solares pueden obtenerse mayores y más tempranas cosechas; los secaderos agrícolas consumen mucha menos energía si se combinan con un sistema solar, y, por citar otro ejemplo, pueden funcionar para hacer trabajar plantas de purificación o desalinización de aguas sin consumir ningún tipo de combustible.

La electricidad que se obtiene de esta manera puede usarse de forma directa (por ejemplo para sacar agua de un pozo, o para instalar sistemas de riego por goteo con energía fotovoltaica, o bien ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas, cuando el usuario demande energía. Incluso es posible inyectar la electricidad sobrante a la red general, obteniendo un importante beneficio.

8. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA O CALÓRICA

Este tipo de energía aprovecha el calor de la radiación emitida por el sol. Entre sus principales aplicaciones están el calentamiento de agua, sistemas de calefacción y generación de electricidad.

La energía calórica se origina al producirse la transmisión de energía de un cuerpo caliente a un cuerpo frío. La cantidad de energía térmica que gana o pierde un cuerpo en contacto con uno de diferente temperatura se denomina calor. La energía térmica se mide en unidades calóricas. Por esta relación directa entre energía térmica y calor es que a este tipo de energía se la denomina energía térmica o energía calórica.

El calor proveniente del sol es almacenado en un colector solar, el cual se encarga de transformar la energía radiante en calor. La radiación solar que el colector recepta es básicamente la que se encuentra en el espectro visible, con longitudes de onda entre 0,29 y 2,5 μm .

8.1 Colectores Solares Térmicos

8.1.1 Colector solar de placa plana

El colector solar de placa plana es uno de los más utilizados para aplicaciones donde no se requiera que la temperatura exceda los 100° C. Este tipo de colectores utilizan la radiación directa y la difusa, son estáticos, requieren de un mantenimiento mínimo y es de fácil construcción. El colector solar de placa plana es el más utilizado a nivel residencial. Este colector está compuesto por una cubierta protectora, una placa de absorción y una lámina reflectante recubierta con aislamiento térmico.

La cubierta protectora tiene como función esencial minimizar las pérdidas por calor hacia la parte exterior del colector.

La placa de absorción es la más importante del colector pues es aquí donde se transforma la radiación solar en calor. Esta placa consta de una plancha metálica en la que se encuentran adherida una tubería, por la cual se transporta el calor mediante el fluido que se encuentra en el interior de la misma.

La carcasa brinda protección y soporte a todos los elementos del colector, además es la que permite anclar o sujetar el colector a la estructura deseada.

Debe ser hermética y resistir a los cambios de temperatura. Está recubierta con aislamiento térmico en el fondo y a los costados para reducir las pérdidas térmicas. Sobre el aislamiento térmico se coloca una reflectante que tiene como objetivo reflejar la radiación posterior y reenviarla a la placa.

8.1.2 Concentrador solar

Este tipo de concentradores reciben el calor generado por la radiación solar y lo aprovechan para generar energía eléctrica. La concentración de calor se puede realizar por dos sistemas: de alta o de baja concentración. El dispositivo para alta concentración o también denominada “central de torre” está formado por discos parabólicos o espejos curvos, a los cuales se los llama helióstatos. Estos deben estar orientados en dirección del sol, una vez que reciben la radiación la reflejan a un punto central receptor. La suma de los reflejos de varios helióstatos concentra gran cantidad de radiación en un solo punto.

8.1.3 Torre Solar

La torre solar aprovecha la energía solar térmica de una manera diferente a las antes mencionadas. En este tipo de generación no se utiliza el principio de concentración de calor y de transmisión del mismo mediante un fluido en tubería.

Una torre solar presenta una gran superficie acristalada en su base y una chimenea en la muy alta. El aire que está en la superficie acristalada se calienta y sube por la chimenea a una gran velocidad. Dentro de la chimenea existen varios generadores eléctricos (similar a los aerogeneradores), que producen electricidad. Se puede mejorar el sistema acoplado concentradores de calor en la base acristalada, de esta manera es posible generar electricidad en la noche.

9. ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La energía fotovoltaica es el nombre descriptivo para una tecnología en que la energía radiante del sol es convertida a energía eléctrica de corriente directa. Los sistemas de energía fotovoltaica permiten la transformación de la luz solar directamente en energía eléctrica, es decir, la conversión de una partícula luminosa con energía (fotón) en una energía electromotriz (voltaica). El elemento principal de un sistema de energía fotovoltaica es la **célula fotoeléctrica**, un dispositivo construido de silicio (extraído de la arena común) la cual no tiene piezas móviles ni necesita operarios humanos, no produce cenizas, emisiones atmosféricas, filtraciones de líquidos toxicas, o ruidos.

Los paneles solares están constituidos por estas células, que conexas adecuadamente suministran voltajes suficientes para, por ejemplo, la recarga de unas baterías. Tienen utilidad en múltiples campos, desde el ámbito doméstico, hasta los satélites artificiales.

Cuando la energía luminosa incide en la célula fotoeléctrica, existe un desprendimiento de electrones de los átomos que comienzan a circular libremente en el material. Si medimos el voltaje existente entre los dos extremos del material (positivo y negativo) observaremos que existe una diferencia de potencial entre 0,5 y 0,6 voltios.

Este sistema básico de generación de energía por medio de la luz solar, puede obtener un rendimiento mayor si se disponen dispositivos de control adecuados. Posteriormente, la energía obtenida debe ser almacenada para que pueda ser utilizada por la noche o cuando el usuario lo requiera. Los paneles solares pueden acoplarse en forma modular, ello permite que puedan pasar de un sistema doméstico de generación de energía, a otro más potente para industrias o instalaciones de gran consumo.

9.1 El panel fotovoltaico

Los módulos fotovoltaicos o colectores solares fotovoltaicos (llamados a veces paneles solares, aunque esta denominación abarca otros dispositivos) están formados por un conjunto de celdas.

Las Células fotovoltaicas producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellas. El parámetro estandarizado para clasificar su potencia se denomina potencia pico, y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas, que son:

- Radiación de 1000 W/m^2
- Temperatura de célula de 25° C (en laboratorio)

Las placas fotovoltaicas se dividen en cristalinas y amorfas:

Las placas fotovoltaicas cristalinas pueden ser monocristalinas y policristalinas.

Las monocristalinas se componen de secciones de un único cristal de silicio (reconocibles por su forma circular u octogonal, donde los cuatro lados cortos, si se observa se aprecia que son curvos, debido a que es una célula circular recortada, ver Figura 3).

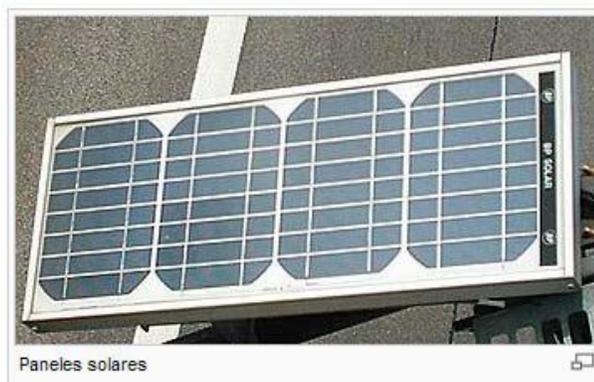


Figura 3. Panel Solar monocristalino.

Las policristalinas están formadas por pequeñas partículas cristalizadas. En el caso de las placas amorfas, éstas se obtienen cuando el silicio no se ha cristalizado aún.

9.2 El Sistema Fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de dispositivos cuya función es transformar la energía solar directamente en energía eléctrica, acondicionando esta última a los requerimientos de una aplicación determinada. Consta principalmente de los siguientes elementos:

- Arreglos de módulos de celdas solares.
- Estructura y cimientos del arreglo.
- Reguladores de voltaje y de corriente
- controlador de carga de batería
- inversor de corriente cd/ca o un rectificador ca/cd.
- Baterías de almacenamiento eléctrico y recinto para ellas.
- Instrumentos.
- Cables e interruptores.
- Red eléctrica circundante.
- Cercado de seguridad, sin incluir las cargas eléctricas

Un sistema fotovoltaico (ver Fig. 4) no siempre consta de la totalidad de los elementos arriba mencionados. Puede prescindir de uno o más de éstos, dependiendo del tipo y tamaño de las cargas a alimentar, el tiempo, hora y época de operación y la naturaleza de los recursos energéticos disponibles en el lugar de instalación.



Figura 4. Sistema fotovoltaico

Existen tres modalidades básicas en un Sistema Fotovoltaico dependiendo de su utilización:

- **Diurno.** No requiere de un bloque de acumulación.
- **Nocturno.** Requiere de un bloque de acumulación (baterías).
- **Continúo (día y noche).** También requiere de un bloque de acumulación.

9.3 Funcionamiento del Sistema Fotovoltaico

En un sistema típico, el proceso de funcionamiento es el siguiente: la luz solar incide sobre la superficie del arreglo fotovoltaico, donde es transformada en energía eléctrica de corriente directa por las celdas solares; esta energía es recogida y conducida hasta un controlador de carga, el cual tiene la función de enviar toda o parte de esta energía hasta el banco de baterías, en donde es almacenada, cuidando que no se excedan los límites de sobrecarga y sobre descarga; en algunos diseños, parte de esta energía es enviada directamente a las cargas.

La energía almacenada es utilizada para abastecer las cargas durante la noche o en días de baja insolación, o cuando el arreglo fotovoltaico es incapaz de satisfacer la demanda por sí solo. Si las cargas a alimentar son de corriente

directa, esto puede hacerse directamente desde el arreglo fotovoltaico o desde la batería; si, en cambio, las cargas son de corriente alterna, la energía proveniente del arreglo y de las baterías, limitada por el controlador, es enviada a un inversor de corriente, el cual la convierte a corriente alterna.

9.4 Ventajas y desventajas de las instalaciones fotovoltaicas

Ventajas

La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes más prometedoras de las energías renovables en el mundo. Comparada con las fuentes no renovables, las ventajas son claras:

- Amigables con el ambiente.
- No produce ruido y contribuye a la reducción de emisiones de efecto invernadero.
- Utilizan fuente renovable (El Sol), contribuyendo a la reducción de uso, de consumo de compra, de combustibles fósiles.
- Instalación simple y mantenimiento mínimo.
- Ofrecen una elevada fiabilidad y disponibilidad operativa excelente.
- Tienen una vida útil de aproximadamente 30 años.
- Resisten condiciones climáticas extremas: granizo, viento, temperatura, humedad.
- Apropriados para el desarrollo de zonas rurales donde no llega la red eléctrica general.
- Uso en aplicaciones para generación de energía en forma distribuida (edificios).
- Flexibilidad en el arreglo y diseño.

Desventajas

- La técnica de construcción y fabricación de los módulos fotovoltaicos es compleja y cara.
- Requieren una importante inversión inicial.
- No son económicamente competitivas con respecto a otras energías actuales.
- Producción variable según climatología del lugar y época del año.
- El rendimiento obtenido por el espacio de terreno ocupado es bajo. Se estima en sólo un 13%.

9.5 El desarrollo fotovoltaico mundial

El silicio solar y la producción de paneles solares fotovoltaicos sigue estando dominado por las células de silicio cristalino las cuales presentan “una madurez tecnológica total en nuestros días.

Después del oxígeno el silicio es el elemento más abundante y distribuido de nuestro planeta, pero no se encuentra aislado, ni puro, sino combinado con oxígeno, por ejemplo en la cuarcita- con un 90% de óxido de silicio (SiO_2), y de la que se debe extraer el oxígeno y las impurezas para obtener en una primera etapa, el silicio de grado metalúrgico con pureza del orden del 90%. Se debe obtener un silicio con menos impurezas, no más de unas pocas partes por millón, para que pueda servir para las industrias electrónica y solar. La forma de hacerlo es mediante una transformación del silicio metalúrgico sólido en gas silano o triclorosilano del cual se extrae el silicio sólido con la pureza adecuada (97% de grado de pureza, para aplicaciones solares).

9.6 Instalación Fotovoltaica conectada a la red

Una instalación fotovoltaica conectada a la red (ver Figura 5) es aquella instalación que aprovecha la radiación solar para generar electricidad mediante paneles fotovoltaicos. La electricidad que se genera en estos paneles es corriente continua, es modificada por un inversor que la convierte en corriente alterna. Esta electricidad transformada a corriente alterna se inyecta a la red por medio de un contador que contabiliza los Kwh (kilowatios hora), que se entregan a la red de distribución.

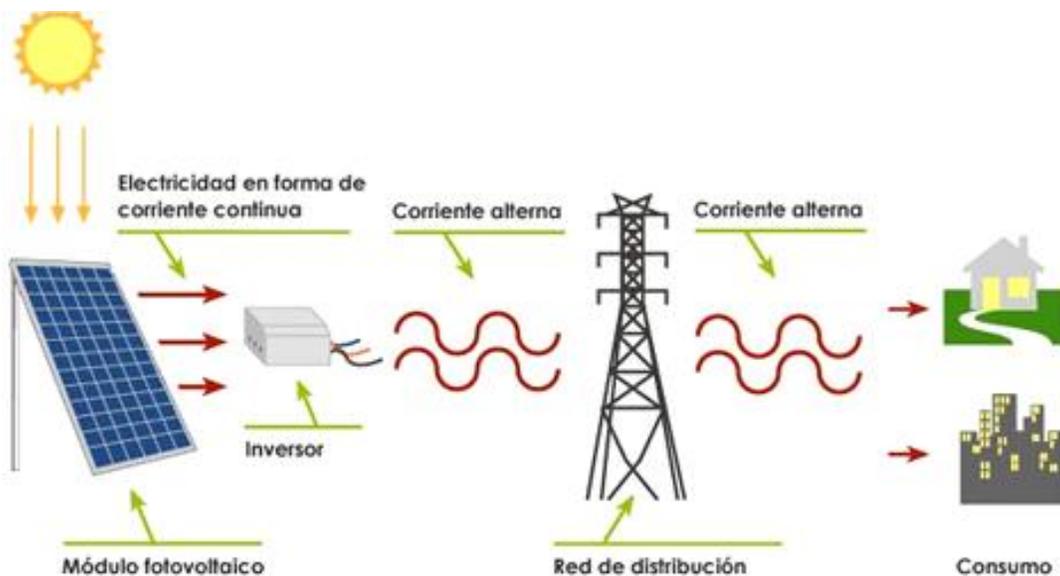


Figura 5. Instalación fotovoltaica conectada a la red.

9.7 Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la red

El uso de sistemas fotovoltaicos para generación de electricidad es una práctica cada vez más común en el ámbito internacional. Durante los últimos 30 años el desarrollo tecnológico en este campo ha permitido una reducción de 95% en el costo de los módulos fotovoltaicos comerciales, a la par de un incremento cercano al 200% en su eficiencia. Un dato que puede servir como referencia para dimensionar el nivel de penetración de esta tecnología en estos últimos años son

los más de 1200MW de potencia pico instalada a nivel mundial, con un crecimiento anual de orden de 16%.

En los países industrializados las tecnologías de dispositivos fotovoltaicos y convertidores estáticos de potencia, así como la reducción de sus costos de fabricación ,la generación fotovoltaica ligada a la red se ha venido convirtiendo gradualmente en una alternativa viable en el esquema de generación distribuida en el, una combinación de plantas centrales y un gran número de pequeños generadores dispersos en la red eléctrica satisfacen la demanda de electricidad ; esto hoy en día es una realidad en algunos países como Dinamarca,Holanda,Alemaniay Japón.

Los generadores fotovoltaicos distribuidos conectados a la red pueden aportar importantes beneficios a los sistemas de distribución, dependiendo de las características y condiciones operativas de red de distribución, así como de la localización de estos dentro de la misma. Los beneficios potenciales más importantes son:

- Suavización de picos de demanda cuando existe cierto grado de coincidencia entre el perfil de generación fotovoltaica y el perfil de consumo del inmueble o alimentador.
- Alivio térmico a equipos de distribución, lo que implica también la posibilidad de postergar inversiones de capital para incrementar la capacidad o reemplazo.
- Disminución de pérdidas por transmisión y distribución.
- Soporte de voltaje en alimentadores de distribución.
- Compensación de potencia reactiva en el alimentador.

9.7.1 Características del sistema fotovoltaico conectado a la red

Los principales componentes de un sistema fotovoltaico conectado a la red son:

- **Arreglo fotovoltaico** que es el elemento encargado de transformar la luz del sol en electricidad.

Un arreglo fotovoltaico está constituido por un determinado número de módulos o unidades fotovoltaicas individuales. El número de unidades depende de la potencia nominal requerida en el arreglo y de la potencia pico de los módulos seleccionados. El voltaje de salida del arreglo, que corresponde al voltaje de operación del inversor se obtiene mediante la conexión serie de un número determinado de módulos; y la potencia a través de la conexión paralelo de dichas series. La potencia nominal de los módulos normalmente está entre 50 y 200 Wp, aunque hoy en día algunos fabricantes ofrecen módulos arriba de 200Wp. El material más comúnmente usado en la fabricación de los módulos fotovoltaicos es el silicio; la eficiencia típica de estos módulos en condiciones estándar de irradiancia y temperatura (i.e., $1,000\text{W}/\text{m}^2$, 25°C , AM1.5) se encuentra entre 12 y 15% para silicio; monocristalino, entre 11 y 14 %, para silicio policristalino; y entre 5 y 7% para los de silicio amorfo.

- **Elemento acondicionador de la potencia producida** (un inversor c.d/c.a), cuya función es adecuar la energía generada por el arreglo a las características eléctricas de la red para su conexión a esta.

El acondicionamiento de la potencia eléctrica generada por el arreglo fotovoltaico (c.d) indispensable para la conexión de esta a la red eléctrica convencional se realiza mediante un inversor (c.d/c.a) que convierte la corriente directa producida por el generador fotovoltaico a corriente alterna, en fase y a la frecuencia de la red para una conexión segura y confiable del

sistema a esta. La eficiencia de los inversores es generalmente mayor a 90% cuando estos operan arriba del 10% de su potencia nominal.

Para extraer siempre la máxima potencia disponible en el arreglo fotovoltaico, el inversor incorpora entre sus funciones un elemento de control que sigue permanentemente el punto de máxima potencia del arreglo (MPPT, por sus siglas en inglés) mediante un ajuste continuo de la impedancia de la carga.

En relación a los aspectos de seguridad y de calidad de la energía producida, las compañías suministradoras del servicio eléctrico requieren de los fabricantes y usuarios de estos equipos el cumplimiento de normas y disposiciones aplicables que, garanticen que la instalación y operación del inversor, y del sistema fotovoltaico en su conjunto, sea segura y no afecte adversamente la calidad de la energía.

Tradicionalmente es un solo inversor (de la capacidad adecuada) el que maneja la potencia nominal de todo un arreglo fotovoltaico. Sin embargo, cada vez es más común el uso de varios inversores conectados en paralelo y cada uno maneja una parte proporcional de la potencia del arreglo. Incluso en algunos casos, el inversor viene directamente montado en el respaldo del módulo de manera individual (módulos c.a). El uso de estas dos últimas configuraciones, inversores en paralelo y "módulos c.a", muy probablemente será incrementado en el futuro en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos integrados a los edificios. Esta característica facilita más la expansión de la capacidad de los sistemas, que opera independiente y emplea una instalación más sencilla.

9.7.2 Configuración típica de un sistema conectado a la red

La principal aplicación de los sistemas fotovoltaicos ligados a la red, cuya principal aplicación se da en viviendas o edificaciones dentro de las zonas urbanas, los elementos convertidores (módulos fotovoltaicos) encargados de transformar la luz del sol en electricidad se instalan sobre el techo de las construcciones para proveer

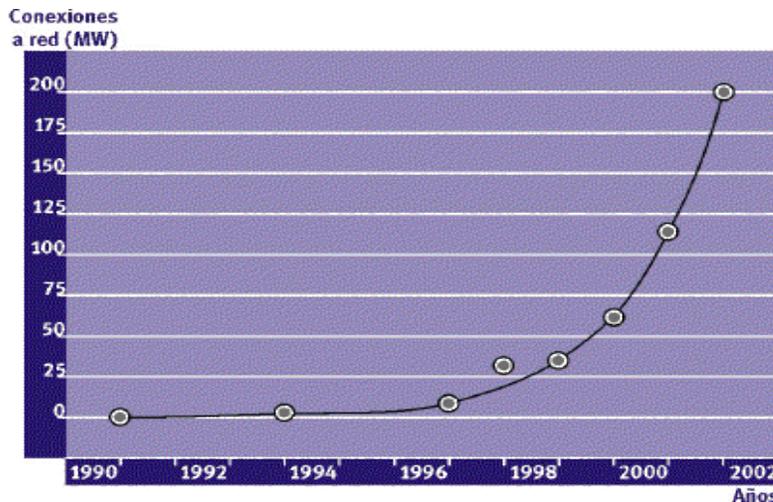
a estos una mayor y mejor exposición a los rayos solares .En cuanto a la conexión eléctrica del sistema a la red, esta se lleva a cabo a través de un inversor.

Como cualquier otra instalación eléctrica, estas instalaciones se habilitan con los medios apropiados para realizar, adecuadamente y en forma segura. La conexión y la desconexión eléctrica del sistema fotovoltaico de la red; y para proporcionar la adecuada protección al equipo y a las personas contra condiciones de operación no deseadas. Para tales efectos, se siguen las normas y recomendaciones de carácter general; y las establecidas en particular para este tipo de aplicaciones, como es la norma IEEE Std 1547 (IEEE, Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems).

La electricidad para alimentar las cargas en el inmueble puede venir (total o parcialmente) del sistema fotovoltaico o de la red eléctrica convencional indistintamente. La fuente de energía que provee la electricidad a las cargas es transparente en todo momento para el usuario. Cuando existe un déficit entre la demanda de electricidad en el inmueble respecto a la generación fotovoltaica, este diferencial es cubierto con electricidad proveniente de la red eléctrica convencional.

9.7.3 Panorama mundial de la conexión a red

A nivel mundial la potencia de instalaciones fotovoltaicas conectadas a red prácticamente se duplica cada año desde 1998; como ejemplo, de 120 MW instalados en el 2000 la potencia creció hasta 200 MW en el 2001. Esta tendencia se mantiene y amplía en los últimos años (Ver Gráfica 3).



Gráfica 3. Crecimiento mundial de los sistemas conectados a la red.

En esta aplicación de los sistemas fotovoltaicos se encuentran a la vanguardia Japón y Alemania, con 90 MW de sistemas instalados a la red en el 2001. Se confirma un crecimiento muy fuerte en los últimos años.

En comparación con Japón, los sistemas conectados a red en Cuba deberán competir con ventajas. En el caso de Europa y en particular de Alemania, debido a la mayor insolación y radiación en nuestras latitudes, la generación de un sistema en Cuba producirá más energía. Mientras que en Alemania y el resto de Europa los sistemas conectados a red sustituyen energía generada con grandes hidroeléctricas y plantas nucleares en sistemas nacionales interconectados a través de todo el continente, en Cuba sustituiría básicamente energía de termoeléctricas de baja y mediana potencia y eficiencia, que queman combustibles fósiles para un sistema relativamente pequeño y débil, largo y estrecho, lo que resultaría en una mayor ventaja económica.

En un informe del Instituto del Medio Ambiente de la Comisión Europea, al pronosticar la evolución del crecimiento fotovoltaico mundial, se exponen las siguientes cifras, basadas en las llamadas hojas de ruta elaboradas para Japón, los Estados Unidos y la Comunidad Europea (Tabla 2).

Tabla 2				
AÑO	2000	2010	2020	2030
EE.UU (MW)	140	3 000	15 000	25 000
Europa (MW)	150	3 000	15 000	30 000
Japón (MW)	250	5 000	30 000	72 000
Todo el mundo (MW)	1000	14000	70000	140000

Tabla 2.Crecimiento fotovoltaico a nivel mundial.

10. PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA DE 900 KW EN LA TRINIDAD

10.1 Descripción técnica y conformación general del Proyecto

El Proyecto de **Generación de Energía Eléctrica con Sistemas Fotovoltaica**” consiste en la instalación de 900kW de paneles fotovoltaicos en la comunidad de la Trinidad ubicada en la ciudad de Diriamba, que será conectado a la red eléctrica. Este sistema tiene una configuración similar a los sistemas autónomos, siendo la diferencia la ausencia de baterías ya que se utiliza la red como respaldo y la otra es el inversor que permite inyectar electricidad a la red mediante la conversión de corriente DC a AC transfiriéndose posteriormente a un sistema de transformador que elevara el voltaje al requerido por la red eléctrica de Gas Natural.

Un esquema similar se muestra en la Figura 6.

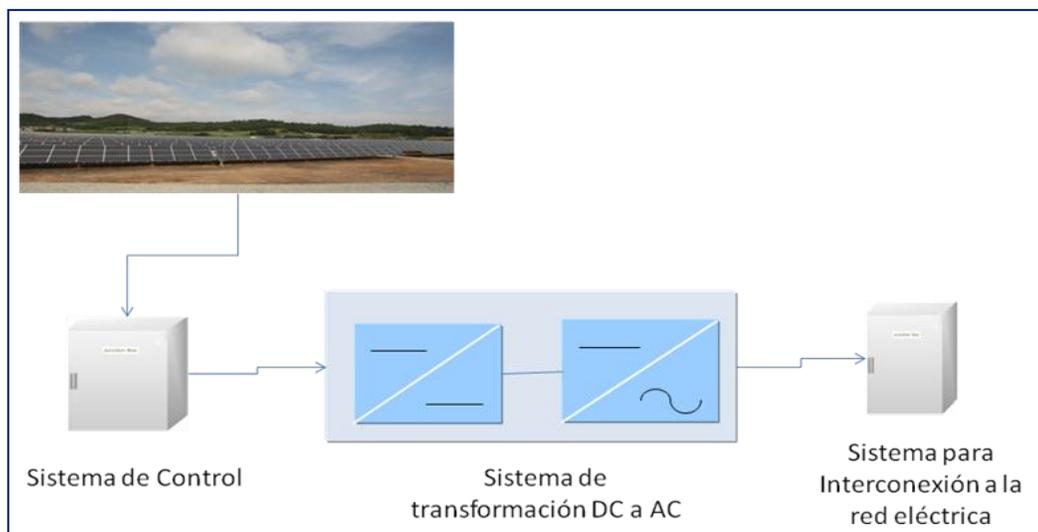


Figura 6. Componentes de un sistema fotovoltaico.

10.2 Ubicación

El Proyecto se construirá en la comunidad de la Trinidad del Municipio de Diriamba, departamento de Carazo, utilizando una área de aproximadamente de 3 hectáreas. Este proyecto se construirá en un sistema de arreglo de paneles solares (ver Figura 7).



Figura 7. Arreglo de varios paneles solares.

Así mismo, en el sitio (Ver Mapa del Sitio, Figura 8), se harán los movimientos de tierra necesarios para garantizar la instalación apropiada de todos los paneles y dispositivos electrónicos y eléctricos.

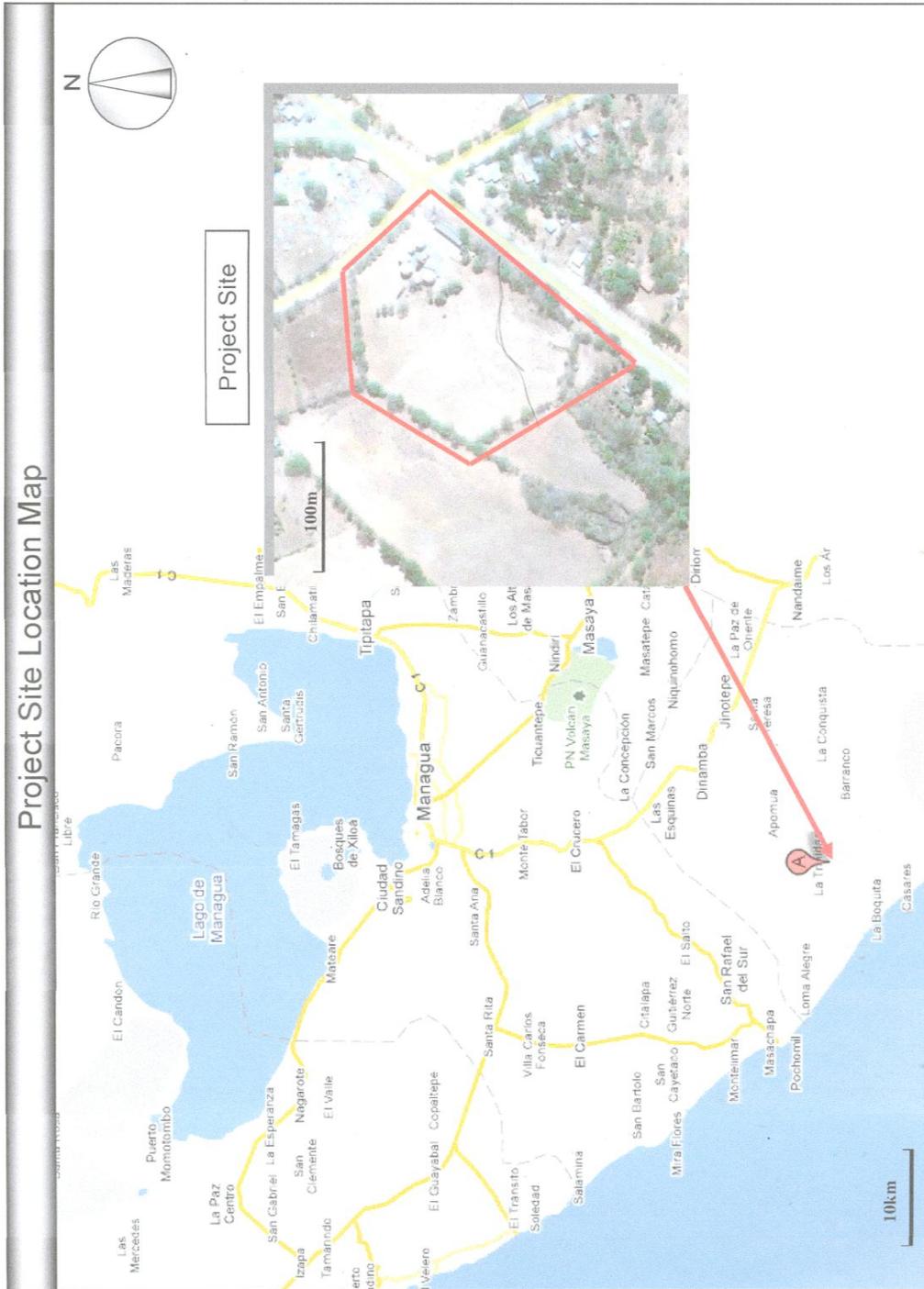


Figura 8. Mapa del Sitio La Trinidad, Diriamba.

10.3 Datos Técnicos

Equipos considerados en el Sistema

A continuación se presentan los componentes principales de los equipos que se contemplan adquirir a través del proyecto:

- **Módulos Fotovoltaicos** para generar energía eléctrica en Corriente Directa (DC)
- **Sistema de control y protección**
- **Sistema de inversión de DC a AC** para la interconexión con la red.

A continuación se presenta en la Tabla 3. el detalle de los equipos considerados:

No.	Descripción.	Cantidad	Unidad
1	Módulos FV e Inversores		
	1) Módulos Fotovoltaico (1000W)	800	Unid
	2) Inversor (125kW)	8	Unid
2	Equipos Eléctricos		
	1) Panel Eléctrico	1	Unid
	2) Materiales Eléctricos y transformación	1	Global
3	Panel principal y Sistema de Monitoreo		
	1) Panel Principal	1	Unid
	2) Programa de Monitoreo	1	Unid
	3) Sensores de Temperatura y radiación solar	1	Global
	4) Sistema de interruptores principales.	1	Global

Tabla 3. Detalle de equipos considerados en Proyecto La Trinidad.

La instalación de la planta; no provocara problemas de conexión a la red, ya que la capacidad de la subestación es de 25 MW y la tensión del cable de transmisión de 24.9KV (Circuito trifásico trifilar). Se utilizarán módulos con fotoceldas de cristal de silicio para el presente proyecto, ya que su rendimiento energético es el más alto cuando la dimensión es limitada.

10.4 Aspectos Ambientales

La contribución de este Proyecto tendrá un impacto positivo en el medio ambiente por efectos de la sustitución de los recursos energéticos actualmente utilizados, además se espera reducir aproximadamente 1030 TonCO₂/año con la reducción del consumo de 2,595 barriles de fuel oíl aproximadamente al año.

10.5 Costo de la Inversión y Costo de la Operación

Inversiones

El monto de requerido para ejecutar el proyecto es de US\$11,953 y se estima implementarlo en 2 años (de agosto 2010 a diciembre 2011) para poner en marcha la Planta Fotovoltaica a partir del año 2012 con sus inversores de potencia, paneles eléctricos y demás instalaciones de equipos asociados. De la inversión total el Gobierno del Japón donará US\$11,452.6 miles, el Gobierno de Nicaragua participará con una contrapartida de US\$ 500.4 miles.

Costo por kW Instalado

Con una inversión de US\$ 11.953 miles y 900 KW de capacidad instalada en la planta fotovoltaica resulta un costo de US\$14,941 /por kW instalado.

Venta de Energía Eléctrica

Se estima que las ventas de energía eléctrica sean de 1,417 MWh anuales iniciándola actividad comercial a partir del año 2 del proyecto, debido a que

el año 2010 y 2011 (año 0 y 1 del proyecto) corresponden al plan inversionista de instalación de equipos.

Ingresos Totales

En la generación de ingresos se consideran dos fuentes: a) ventas de energía al distribuidor Gas Natural en el área de concesión de DISSUR, y b) el valor residual de las inversiones que en el horizonte del proyecto se considera un ingreso extraordinario de liquidación debido al valor de recuperación que adquieren los activos que aún no han llegado a su vida útil.

Por conveniencia colocamos el valor residual en la penúltima fila del Flujo de Fondos Netos para no afectar por pagos de impuestos nacionales, además hemos supuesto que en el valor de salvamento de los activos no ocurren ni se generan ganancias de capital.

- Tarifa por venta de energía a Gas Natural: US\$0.1967/kWh.
- Valor residual de liquidación año 2035: US\$ 2,565.8 miles

Gastos de O&M, Depreciación y Gasto Financiero

Gasto de O&M

Los costos de O&M incluyen el pago de salarios de un ingeniero electricista con experiencia en sistemas fotovoltaicos, el 13avo mes y la contribución al INSS, de igual forma incluye los gastos por materiales de oficina, repuestos y accesorios y los pagos por servicios básicos.

Depreciación y Valor Residual

La depreciación se calculó seleccionando los activos sujetos de depreciación por, US\$ 11,710.6 miles; razón por la que se restó del total de inversión US\$ 11,953 miles los US\$242.4 miles de la actividad de ingeniería, supervisión y administración de Contrapartida Local. La vida útil de los inversores SMA 125 con valor de US\$1,052.6 miles tiene vida útil de 20 años. Para los otros componentes de inversión con monto de US\$ 10,658 miles se aplicó una vida útil de 30 años, esto hace que la depreciación anual sea de US\$ 407,898 y al final del período de proyección el valor residual alcance US\$ 2,565,8 miles

- Inversión a Depreciar 11 710.6 miles
- Valor Residual 2, 565.8 miles
- Depreciación Anual 407,898 miles

Gasto Financiero

El flujo de caja del proyecto es desde el punto de vista de la inversión total o proyecto puro, dado que el proyecto tiene como fuente de financiamiento la cooperación internacional (donación) del Gobierno del Japón, por US\$ 11,452.6 miles, por esta razón no se calculan intereses causados ni se incluyen fuentes de financiamientos bancarios ni se calcula servicio de la deuda.

Impuesto Sobre la Renta e Impuestos Municipales

Para los primeros 7 años de operación del proyecto no hay deducción del IR porque según la Ley No.532 Ley de Promoción de Generación Eléctrica con Fuentes Renovables (PGEFR), publicada en Gaceta No.102, el 24 de mayo de 2005 y según el Cap. II del Régimen Fiscal Arto.7 numerales 3 y 4 de esa Ley, se establecen exoneraciones para: DAI, IVA, IR. El Decreto 1091 del Plan de Arbitrios del Municipio de Managua, publicado en Gaceta No.30, el 12 de febrero de 1991, según Arto.4, inciso C, señala que están exentas del pago de impuesto municipal todas las instituciones del Estado.

Inversión Total

La evaluación indica que el proyecto no es rentable y requiere del subsidio gubernamental, para tornarlo viable y atractivo para el inversionista, para financiar los gastos en módulos FV e inversores, equipos eléctricos y otros gastos de instalación de equipos. Los resultados del VAN, TIR y la R B/C, actualizado a la tasa del 12% resultan en los siguientes valores.

Rentabilidad de la Inversión Total

VAN=	US\$ -9,033.2 miles
TIR =	Indefinida
R B/C=	0.18

El subsidio lo determina el valor negativo del VAN financiero, la TIR tiene un valor indefinido por el alto valor negativo que en el flujo neto de caja tienen las inversiones; la relación beneficio costo es insignificante y en ningún caso se cumple con los criterios de aceptación del proyecto.

10.6 Beneficios del Proyecto

La dotación de este sistema fotovoltaico permitirá que a través de los recursos obtenidos por la venta de la generación de energía se sustituyan equipos eficientes que les ayuden al ahorro de la energía en hospitales, centros de estudios, instituciones de gobierno.

Se crearán alrededor de 80 empleos directos y más de 100 empleos indirectos durante la construcción de la planta.

Se construirá la tubería de agua potable, la cual quedará habilitada para el centro de control y para la comunidad de forma permanente, beneficiando de forma indirecta a más de 300 personas.

Se fortalecerá el conocimiento en energías renovables para el equipo técnico nacional involucrado en el desarrollo del proyecto.

Se creará una base de estudios de referencia para escuelas universidades y otras instituciones estatales y privadas que deseen implementar proyectos similares.

11. CÁLCULOS ASOCIADOS A LA POTENCIA Y ENERGÍA

Las siguientes estimaciones son cálculos basados en los datos recopilados por el Padre Julio López de la Fuente, S.J. a lo largo de un período de 22 años en la Estación Actinométrica VADSTENA/UCA en Managua. Estos datos incluyen valores totales anuales y sus correspondientes valores medios diarios, e incorporan durante el tiempo de medición dos ciclos solares sucesivos de once años.

Para la Planta Solar Fotovoltaica que se ubicará en La Trinidad, se hará necesario estimar la radiación solar que llega a ella y posteriormente, considerando la eficiencia de las instalaciones, determinar cuánto de esa radiación solar se convierte en energía eléctrica.

Así mismo, cuando un sistema solar fotovoltaica aprovecha la energía solar para transformarla en electricidad, se tendrá que considerar también si la radiación solar se recibe en un día soleado o si se capta en un día nublado, en vista que ésta no es la misma. Sin embargo, la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre tendrá un valor medio durante un tiempo determinado; y este valor medio será relativamente constante en el transcurso de largos periodos de tiempo (por ejemplo, de años o siglos).

Para poder calcular la cantidad de radiación solar que llega a superficie terrestre, específicamente la luz que incide sobre los paneles solares fotovoltaicos, habrá que introducir y explicar una serie de conceptos físicos.

En primer lugar, se tiene la "constante solar". La **constante solar** es la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida en la parte externa de la atmósfera terrestre en un plano

perpendicular a los rayos del Sol. Los resultados de su medición por satélites arrojan un valor promedio de $1,366 \times 10^6$ erg/cm² s, o 1366 W/m².

Este dato se obtiene de calcular cuánto irradia el sol en su conjunto, y de este total, cual es la parte que llega a la tierra.

Así pues, para calcular la **constante solar** basta con dividir el flujo energético que emite el Sol por la relación de áreas entre la superficie del Sol (con r_s el radio solar) y la de una esfera situada a la distancia a_0 (una unidad astronómica) del mismo. Para obtener este valor, que en la práctica está medido por satélites, se debe usar como temperatura efectiva (T_{eff}) del Sol el valor 5776 K.

$$K = \sigma \cdot T_{\text{eff}}^4 \cdot \left(\frac{r_s}{a_0}\right)^2 = 1366 \frac{W}{m^2}$$

El valor de la constante solar es de 1,366 W/m².

Para la Tierra en su conjunto, dada su sección transversal de 127,4 millones de km², la energía es del orden de $1,74 \times 10^{17}$ W. Este dato también se mide experimentalmente (por medio de globos sonda y satélites artificiales). En realidad la «constante solar» no es propiamente una constante, pero sí un parámetro que a corto y medio plazo varía dentro de márgenes estrechos y muy poco, de tal manera que se puede considerar como si lo fuera.

En segundo lugar, se debe tener presente que la radiación solar se difunde por la atmósfera terrestre, de forma tal que aproximadamente la mitad de la misma es absorbida por el aire. Las moléculas de aire, al recibir radiación, la absorben aumentando la temperatura del aire, hasta que empiezan a emitir ellas mismas radiación (tanta como reciben) y alcanzan el equilibrio radiactivo.

La radiación solar recibida por la superficie de la Tierra está por lo tanto atenuada, respecto a la que llega a la parte alta de la atmósfera, por distintos procesos que se producen en su recorrido por la atmósfera. Estos procesos son:

- La atmósfera absorbe la radiación solar selectivamente especialmente el vapor de agua y el ozono que impide pasar toda radiación de longitud de onda inferior a 0,29 micras.
- La difusión molecular o de Raleigh debida a los gases atmosféricos y al vapor de agua.
- La difusión y absorción por aerosoles o turbidez.

La atenuación depende fuertemente del camino recorrido por el rayo de luz en la atmósfera y que es mínimo para una distancia cenital $z = 0$ y máximo para un rayo incidiendo por el plano horizontal $z = 90$. El haz de luz atraviesa por lo consiguiente un medio como la atmósfera que puede considerarse estratificado horizontalmente, esto es que el valor de sus propiedades depende exclusivamente de su altura h sobre el nivel del mar.

Al penetrar en la atmósfera terrestre, el haz de la radiación solar, “Radiación Global” (RG), sufre un proceso de absorción y dispersión, lo que se denomina “Radiación Difusa” (RDF), de tal forma que en la superficie terrestre se recibe un flujo energético denominado “Radiación Directa Horizontal” (RDH), expresada en Wh/m^2 .

La Radiación Global se puede por tanto expresar de la siguiente manera Ec. (1):

$$RG = RDH + RDF$$

Ec. (1)

La Radiación Global y Difusa son medidas por piranómetro, mientras un rastreador solar con montura ecuatorial sostiene un pirheliómetro y mide la “Radiación Solar Directa Normal” (NIP), que sirve de punto de partida para poder calcular la Radiación Directa Horizontal.

La Radiación Solar Directa (NIP) se registra con el pirheliómetro, montado sobre una estructura ecuatorial, que rastrea al sol desde su inicio matutino hasta el ocaso vespertino, y que permite que el rayo de luz solar incida siempre sobre una superficie normal, a lo largo de todas las horas del día. En el Anexo A se pueden observar los valores promedios correspondientes al haz solar NIP sobre superficie normal, a lo largo de 22 años, con base a los registros obtenidos en la Estación Actinométrica VADSTENA/UCA en Managua.

La Radiación Directa Horizontal media diaria está determinada por la siguiente expresión experimental (2):

$$RDH = 0.97 * 0.725 * (NIP * \text{sen}Hn) \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

- senHn*: valor de la función senoidal de la elevación solar al mediodía.
NIP: valor medio diario de la Radiación Solar Directa (NIP) o incidencia solar normal.
0.725: constante experimental resultante de sumar las contribuciones horarias del producto (NIP * *senHn*).
0.97: constante que elimina la radiación circunsolar.

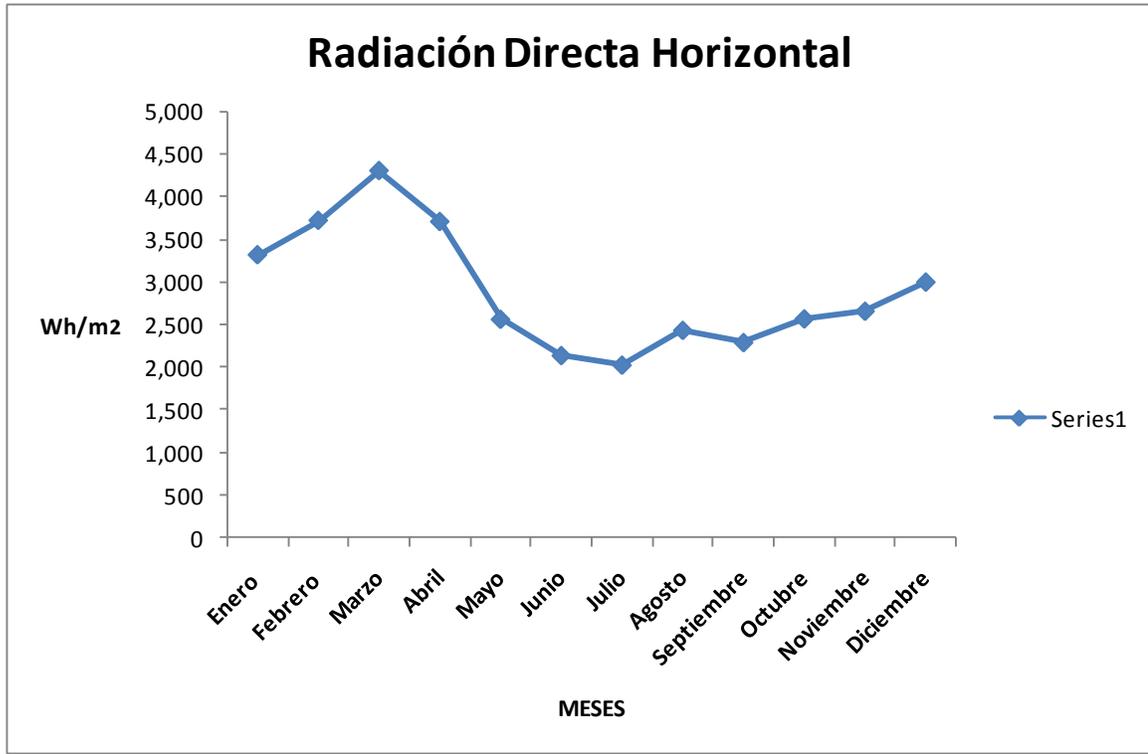
En la Tabla 4 se han representado los valores NIP promedios al medio día para cada mes del año, con respecto a las series de 22 años de medición; el valor de la función senoidal para el ángulo de elevación solar sobre el horizonte senHn y la Radiación Directa Horizontal RDH, calculada según la Ecuación (2).

Radiación Solar Directa “NIP”, Función Senoidal para el Angulo de Elevación Solar sobre el Horizonte “senH” y Radiación Directa Horizontal “RDH” según la expresión: $\text{RDH} = 0.97 * 0.725 * (\text{NIP} * \text{senHn})$

Mes	NIP (Valor Promedio Anual en Wh/m^2)	senHn (Valor Promedio Anual)	RDH (en Wh/m^2)
Enero	5.611	0,83924	3.312
Febrero	5.846	0,903186	3.713
Marzo	6.306	0,968148	4.293
Abril	5.265	0,998939	3.699
Mayo	3.663	0,993211	2.559
Junio	3.095	0,981826	2.137
Julio	2.915	0,987661	2.025
Agosto	3.456	0,999788	2.430
Septiembre	3.305	0,984411	2.288
Octubre	3.931	0,927576	2.564
Noviembre	4.407	0,856087	2.653
Diciembre	5.209	0,816944	2.993

Tabla 4. Cálculo de la Radiación Directa Horizontal.

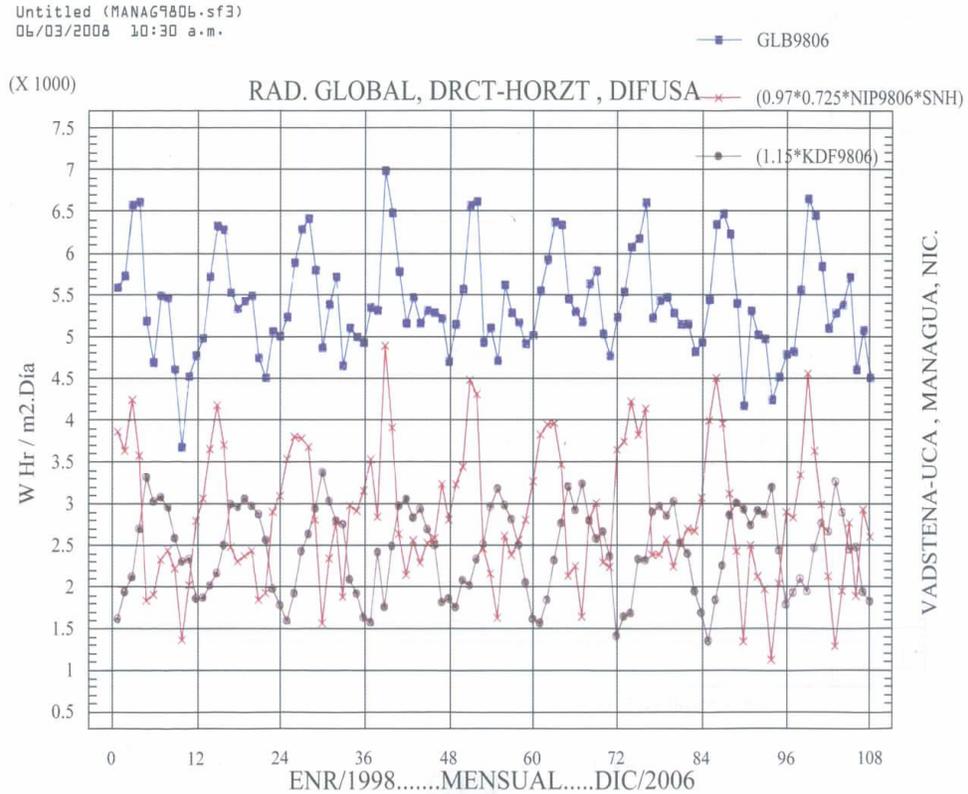
En la Gráfica 4 se observan los resultados promedios de todos los datos estadísticos disponibles para la Radiación Directa Horizontal para cada uno de los doce meses del año. Como puede apreciarse, la RDH alcanza sus valores máximos en los meses de Enero, Febrero, Marzo y Abril, y sus valores mínimos en los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre.



Gráfica 4. Comportamiento mensual de la Radiación Directa Horizontal.

En la Gráfica 5 se puede observar el comportamiento mensual y anual de la Radiación Global, Directa Horizontal y Difusa, durante el período 1998-2006. Se puede apreciar que el valor medio anual de la Radiación Global se encuentra alrededor de 5,409 Wh/m² día; la Radiación Difusa con más regularidad anual se mantiene cerca de 2,439 Wh/m² día; y la Radiación Directa Horizontal presenta variaciones más significativas, con clara separación climática entre la estación seca y húmeda, teniendo un valor medio de 2,865 Wh/m² día.

G1-2



Gráfica 5. Curvas de la Radiación Global, Directa Horizontal y Difusa.

La Planta Solar Fotovoltaica a construirse en La Trinidad, Diriamba, dispondrá de un área de terreno total de $14,000 \text{ m}^2$. Dentro de esta área se ubicarán los paneles solares fotovoltaicos, los cuales según las Especificaciones Técnicas (ver Anexo 2), entregarán una potencia máxima de 900 kW pico o un poco más.

Cada panel fotovoltaico está en capacidad de dar 135 W pico de potencia por cada metro cuadrado (135 W/m^2), con lo cual se requerirá un área de paneles fotovoltaicos para una incidencia de radiación solar normal a la superficie de aproximadamente $6,670 \text{ m}^2$, los que estarán orientados hacia el sur bajo un

ángulo de inclinación que se definirá posteriormente, pero que correspondería aproximadamente al ángulo de la latitud ecuatorial del sitio La Trinidad.

Según las Especificaciones Técnicas (ver Anexo 2), los paneles solares fotovoltaicos que se incorporarán a la planta de energía solar son de origen japonés y tienen una eficiencia de transformación de la energía solar lumínica a energía eléctrica, del 15%. El parámetro estandarizado para clasificar su potencia se denomina potencia pico, y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas, que son:

- radiación de 1000 W/m²
- temperatura de célula de 25 °C (no temperatura ambiente).

De acuerdo a esta característica técnica, un panel solar fotovoltaico con una capacidad pico de 135 W/m², y cuya eficiencia es del 15%, entregaría dicha potencia o más si la radiación solar incidente sobre el mismo, es al menos de 900 W/m².

Dada esta situación, y en vista que la radiación solar en el sitio, de acuerdo a los datos estadísticos recopilados por la Estación Actinométrica VADSTENA/UCA, oscilará entre valores de 2,000 hasta 4,000 Wh/m² en el día, durante los meses del año, entonces habrá que determinar cuánta potencia pico entregará la planta solar fotovoltaica en un momento determinado del día. Lo que está claro es que durante el día, la potencia oscilará de acuerdo a la curva de irradiación diaria correspondiente a las distintas horas del día.

Según los datos estadísticos obtenidos por la Estación Actinométrica VADSTENA/UCA, la Radiación Global (RG), la Radiación Solar Directa (NIP) y la Radiación Difusa (RDF), en términos de energía, se muestran en la siguiente gráfica (Gráfica 6), para las distintas horas de un día típico claro, es decir sin

nubosidad.



Gráfica 6. Radiación Global, Solar Directa y Difusa para un día claro.

En esta gráfica se observa la curva de distribución diaria, en intervalos de 1 hora, para cada uno de las diferentes tipos de radiaciones. Se puede ver que, mientras la Radiación Global sigue una curva senoidal, la Radiación Solar Directa (NIP) se parece a una ventana romana y la Radiación Solar Difusa (RDF) a una curva plana. Esta curva ha sido elaborada por la Estación Actinométrica VADSTENA/UCA para un día claro típico (casi sin nubosidad), en este caso, el 27 de enero de 2005. En este día, la NIP total del día fue 8,618 Wh/m² día.

Por otro lado, al considerar en esa Gráfica 6, los dos tercios (2/3) de horas diarias a partir del mediodía solar (de 8 am a 4 pm, para un día medio de doce horas solares) y despreciando la radiación solar antes de las 8 am y después de

las 4 pm, se obtienen las siguientes razones de valores para el día 27 de enero de 2005:

$$RG_{8-4} / RG_{\text{día}} = 0.95$$

$$NIP_{8-4} / NIP_{\text{día}} = 0.88$$

$$RDF_{8-4} / RDF_{\text{día}} = 0.86$$

Si se estudian estos datos por al menos un año, se puede observar lo siguiente:

$$RG_{8-4} = 0.90 RG_{\text{día}}$$

$$NIP_{8-4} = 0.83 NIP_{\text{día}}$$

$$RDF_{8-4} = 0.86 RDF_{\text{día}}$$

Se puede ver que en las dos primeras (6-8 am) y dos últimas horas del día (4-6 pm), la radiación solar contiene solamente un aproximado del 5% de su valor diario.

Esto significa que, para fines prácticos, la potencia útil de una instalación solar, como es el caso de la Planta Solar Fotovoltaica en La Trinidad, Diriamba, se obtendrá en la mayoría de los casos entre las 8 am y las 4 pm.

Por lo tanto, se puede estimar con base a lo anterior, que el número de horas totales en el año con radiación solar en la zona de La Trinidad, Diriamba, se corresponde con el número de horas en el año con radiación solar en la costa del Pacífico de Nicaragua. En promedio se estima un total de 9 horas diarias de radiación solar, que totalizan en el año aproximadamente:

$$t_{\text{radiación anual}} = 9 \text{ horas/día} \times 365 \text{ días}$$

$t_{\text{radiación anual}} = 3,285 \text{ horas/año}$

Considerando que hay dos estaciones en Nicaragua: la seca de 6 meses y la húmeda o lluviosa de 6 meses, se puede establecer que por estación se tendrá un máximo de aproximadamente 1,600 horas de aprovechamiento de la radiación solar. Sin embargo, en la estación húmeda el número de horas con radiación solar es menor, principalmente por efecto de la cobertura de nubes (Octas) o nubosidad. El número de horas con radiación solar puede llegar a variar hasta un valor mínimo aproximado de unas 800 horas en la temporada húmeda o lluviosa, aunque se mantendrá entre las 800 y 1,600 horas. Por tal razón, se ha estimado un valor promedio de 1,200 horas de radiación solar en la temporada de lluvias. Así pues, se tendrá en el año en promedio un total de horas con radiación solar equivalente a $1,600 + 1,200 = 2,800$ horas.

En un día claro, sin nubes, se tendría que para un sistema solar fotovoltaico que recibe un haz de luz solar, la radiación que llegará a la superficie será aquella en forma de Radiación Directa Horizontal.

A partir de estas curvas (Gráfica 6) se puede obtener, con base a la expresión dada en Ec. (1), la curva para la Radiación Directa Horizontal. Esta se muestra en la siguiente gráfica (Gráfica 7).

Gráfica 7. Radiación Directa Horizontal para un día claro.

Sin embargo, otro factor importante que afecta directamente la potencia entregada por un sistema solar fotovoltaico es la cobertura de nubes. Su presencia es determinante en la cantidad de radiación solar, claridad atmosférica y temperatura ambiental, así como en la iluminación.

Para un día completamente nublado, la radiación solar que llega a la superficie no es directa, sino que difusa. Esto significa que los niveles de energía se ven notablemente disminuidos y siguen los valores que se muestran en la Gráfica 6 y 7.

Con base a este hecho, se puede obtener, para un día claro y un día completamente nublado, la curva de Energía Solar diaria aprovechable por la Planta Solar Fotovoltaica, a ser ubicada en La Trinidad, Diriamba.

Los valores de esta Energía Solar diaria aprovechable se pueden estimar de acuerdo a la siguiente expresión:

Para una Radiación Solar Directa, NIP, la Energía solar aprovechable en una hora determinada se estimaría de acuerdo a la siguiente expresión general:

$$E_{th(día\ claro)} = NIP_h * Eff_{Panel} * (1 - Octas/Octas_{max}) \quad Ec. (3)$$

donde:

NIP_h Radiación Solar Directa (NIP) en una hora específica del día

Eff_{Panel} Eficiencia del Panel Solar

$Octas/Octas_{max}$ El valor de cobertura de nubes (octas) dividido por el valor máximo de cobertura $Octas_{max}$ (este valor es igual en teoría a 8).

Para el caso del proyecto específico, la eficiencia de los paneles solares es de 15% y el valor de las Octas = cero. Por lo tanto la expresión se reduce a lo siguiente:

$$E_{th(día\ claro)} = NIP_h * 0.15 \quad \text{Ec. (4)}$$

Cuando las Octas alcanzan su valor máximo, que en Nicaragua ha sido 7.7, indicando esto una cobertura total, en la estación húmeda o lluviosa, entonces la expresión Ec. (4) se transforma en:

$$E_{th(día\ nublado)} = NIP_h * 0.15 * (1-7.7/8)$$

$$E_{th(día\ nublado)} = NIP_h * 0.006 \quad \text{Ec. (5)}$$

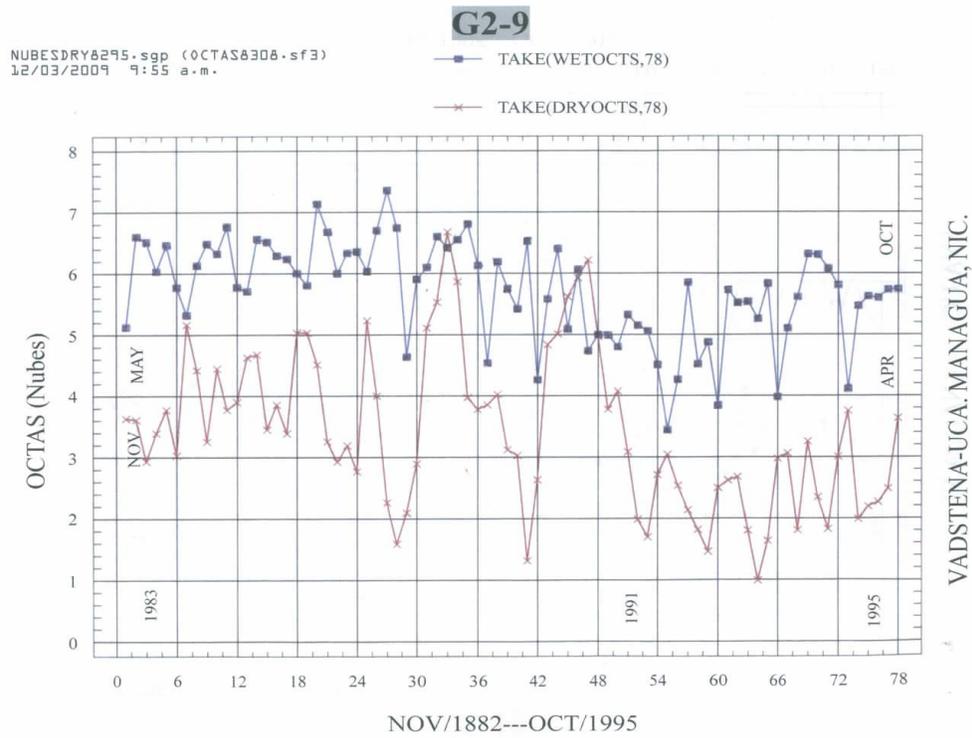
Así pues, para un día parcialmente nublado, se tendría un promedio de Octas alrededor de un valor de 3.8, con lo cual obtendríamos la expresión siguiente:

$$E_{th(día\ parc.\ nublado)} = NIP_h * 0.08 \quad \text{Ec. (6)}$$

Hay que tener presente, que en Nicaragua, en la estación seca, la formación de nubes es mínima y que por lo tanto las horas de luz producirán la máxima radiación solar y por consecuencia, la máxima potencia eléctrica; no es el caso

para los días en la estación húmeda, donde hay mucha formación de nubes, en diferentes horas del día, pudiendo oscilar por tanto la potencia eléctrica de una hora a otra, y de un día para otro.

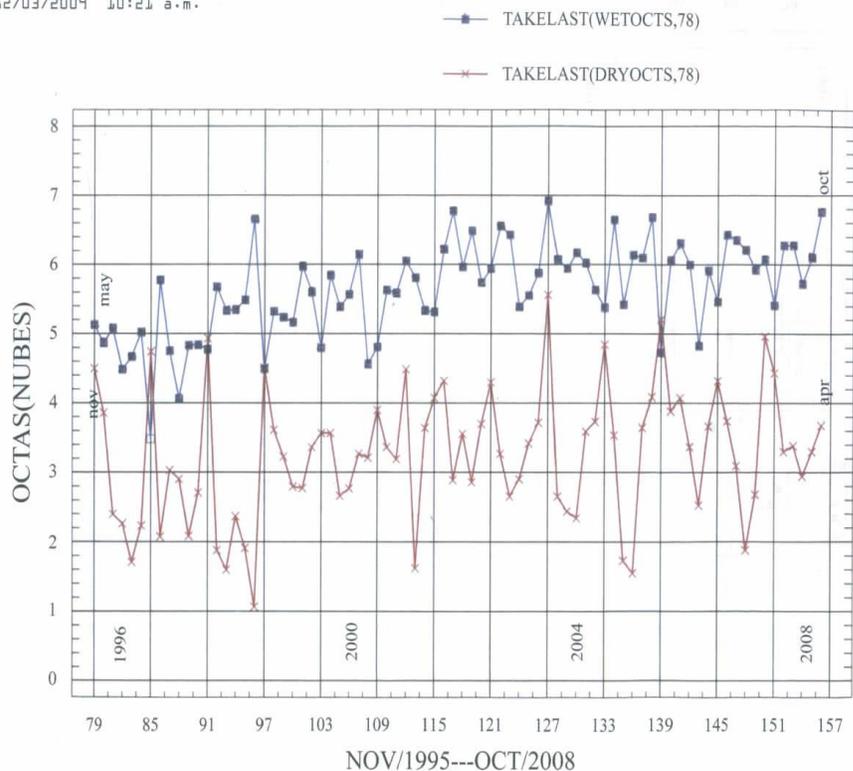
En Nicaragua existen dos estaciones: la seca (de noviembre a abril) y la húmeda (de mayo a octubre). Como es natural, la estación húmeda presenta una cobertura de nubes (denominada "Octas") mayor que la estación seca; también de manera análoga, la cobertura de nubes es mayor en algunos años, que en otros; por ejemplo en años de sequía se ha observado una menor cobertura de nubes aún en los meses de la estación húmeda. En las Gráficas 8 y 9 se observa la curva con los valores medios mensuales para la cobertura de nubes (Octas), según las estaciones seca y húmeda para el periodo de 26 años (Nov/1982-Oct/2008) respectivamente.



Gráfica 8. Cobertura de Nubes (Octas) en el período Nov/1982-Oct/1995.

G2-10

NUBESWET9608.sgp (NUBESWET9608.sf3)
12/03/2009 10:21 a.m.



VADSTENA-UCA. MANAGUA,NIC.

Gráfica 9. Cobertura de Nubes (Octas) en el período Nov/1995-Oct/2008.

Un resumen de los valores estadísticos se aprecia en la Tabla 5. Por ejemplo, un valor máximo de 7 octas aconteció durante Jun/86 y Jul/87, mientras que un

mínimo de 1 octas se dio en Feb/93 y Abr/98 (Datos estadísticos de la Estación Actinométrica VADSTENA/UCA).

	1982-86		1986-90		1990-95	
	Seco	Humedo	Seco	Humedo	Seco	Humedo
Valor medio	3.8369	6.206	4.1494	5.8961	2.5059	5.1985
Mediana	3.7038	6.3065	4.0132	6.0807	2.4919	5.3947
Desv.Stand	0.7316	0.4624	1.5281	0.8248	0.7558	0.7401
Max	5.1667	7.1333	6.6771	7.3548	4.0775	6.3118
Min	2.7667	5.129	1.3157	4.2581	0.9881	3.4409
Coef.Variacion	19.07	7.45	36.83	13.99	30.16	14.24
	1995-2000		2000-04		2004-08	
	Seco	Humedo	Seco	Humedo	Seco	Humedo
Valor medio	2.921	5.1455	3.4263	5.9278	3.4939	5.9678
Mediana	2.7859	5.1452	3.4895	5.9463	3.5912	6.0877
Desv.Stand	0.9632	0.6403	0.8291	0.4943	0.9592	0.5342
Max	4.9333	6.6559	5.5664	6.9216	5.2112	6.7634
Min	1.0667	3.4839	1.6237	4.8065	1.548	4.7312
Coef.Variacion	32.98	12.44	24.2	8.3382	27.45	8.95

Tabla 5. Datos estadísticos de la cobertura de nubes en la Estación Actinométrica VADSTENA/UCA)

Por otro lado, para determinar cómo afectará la cobertura de nubes a la potencia eléctrica de la Planta Solar Fotovoltaica en La Trinidad, Diriamba, a lo largo de todo un año, se tomará de referencia la correlación inversa que existe entre el brillo solar (que a su vez está en correlación con la Radiación Global, la Radiación Directa y la Radiación Directa Horizontal) y la cobertura de nubes (octas), a lo largo de la estación climática seca y húmeda, lo que se puede apreciar en las curvas que se muestran en el Gráfico 10. Se observa que cuando el brillo solar es máximo, esto significa que la cobertura de nubes es mínima, o viceversa, cuando se tiene máxima cobertura de nubes, el brillo solar es mínimo.

G6-4

DECDS10CT9705.sgp (S10CTDEC9705.sf3)
17/04/2008 4:31 p.m.

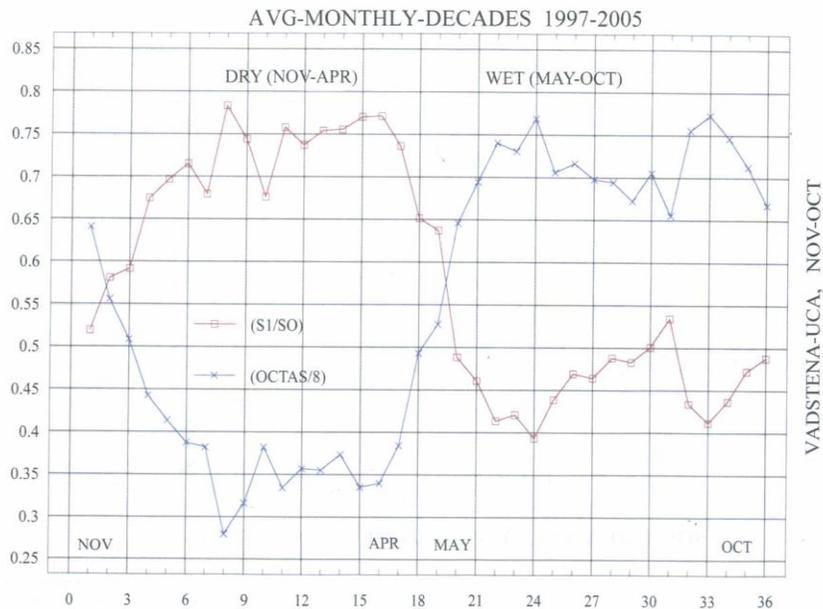


Gráfico 10. Correlación de la Radiación Global, la Radiación Directa y la Radiación Directa Horizontal) con respecto a la cobertura de nubes (octas), a lo largo de la estación climática seca y húmeda,

Así mismo, se identifican en el gráfico las dos intersecciones que tienen lugar en la segunda década mensual 11-20 de noviembre al comenzar la estación seca y durante la segunda década de mayo (11-20), con el inicio de la estación húmeda o lluviosa. En estos dos períodos de transición, existe gran variación en los días, en lo que respecta a la cobertura de nubes y al brillo solar, y por consiguiente la Radiación Directa Horizontal.

En la Tabla 6 se presentan los valores mensuales de la Radiación Solar Directa (NIP), la Radiación Directa Horizontal (RDH), la energía radiante promedio del

día (ERD) en un mes específico, el número de horas de radiación promedio durante el día en un mes determinado y la energía eléctrica que generaría la Planta Solar Fotovoltaica en La Trinidad, Diriamba, en el mes en consideración.

Radiación Solar Directa "NIP", Función Senoidal para el Angulo de Elevación Solar sobre el Horizonte "senH" y Radiación Directa Horizontal "RDH", según la expresión:

$$RDH = 0.97 * 0.725 * (NIP * \text{senHn})$$

Mes	NIP Wh/m ² día	RDH Wh/m ² día	ERD Wh/m ² día (NIP+RDH)/2	t _d Horas en el día	t _m Horas en el mes	Energía Eléctrica generada en el mes (kWh)	Potencia Eléctrica Promedio en el Mes (kW)
Enero	5,611	3,312	4,462	9	279	120,436	432
Febrero	5,846	3,713	4,780	9	252	116,535	462
Marzo	6,306	4,293	5,300	9	279	143,058	513
Abril	5,265	3,699	4,482	9	270	117,087	434
Mayo	3,663	2,559	3,111	7	217	65,318	301
Junio	3,095	2,137	2,616	6	180	45,560	253
Julio	2,915	2,025	2,470	6	186	44,451	239
Agosto	3,456	2,430	2,943	7	217	61,791	285
Septiembre	3,305	2,288	2,797	6	180	48,703	271
Octubre	3,931	2,564	3,248	5	155	48,703	314
Noviembre	4,407	2,653	3,530	7	210	71,724	342
Diciembre	5,209	2,993	4,101	8	248	98,404	397
Total Año						981,771	

Tabla 6. Energía Eléctrica promedio que generará la Planta Solar Fotovoltaica de La Trinidad, Diriamba.

La energía radiante promedio del día (ERD) se ha obtenido promediando los valores de la NIP y de la RDH. Esto se fundamenta en el hecho de que los

paneles de la planta solar fotovoltaica estarán inclinados bajo un ángulo con respecto a la horizontal, de tal forma que puedan recibir durante algunas horas (aproximadamente 4 horas) una radiación solar de un valor cercano al equivalente de la NIP. Durante las otras 4 horas, los paneles recibirán una radiación directa horizontal, como consecuencia del movimiento relativo del sol. De esta manera, en promedio diario, los paneles solares recibirán una combinación de radiación solar directa (NIP) y radiación directa horizontal (RDH). Además, se han considerado las 8 horas de máxima radiación (término $RDF_{8-4} / RDF_{\text{día}} = 0.86$, es decir de las 8:00 am a las 4:00 pm).

El cálculo ha sido un simple promedio aritmético:

$$ERD_{(promdia/mes)} = (RDF_{8-4} / RDF_{\text{día}}) * [NIP_{(día)} + RDH_{(día)}] / 2 \quad \text{Ec. (7)}$$

La energía eléctrica promedio que puede generar la instalación solar fotovoltaica durante un mes dado será entonces, la energía radiante diaria promedio en las 8 horas de máxima radiación multiplicada por el número de días del mes, la eficiencia y el área total de los paneles solares:

$$EE_{(promdia/planta)} = ERD_{(promdia/mes)} * A * (t_m/t_d) * Eff_{Panel} \text{Ec. (8)}$$

Donde:

$ERD_{(promdia/mes)}$	Energía radiante promedio del día durante un mes
Eff_{Panel}	Eficiencia del Panel Solar
A	Área de la superficie de paneles solares
t_m	Total de horas en el mes con radiación solar.
t_d	Total de horas en el día con máxima radiación solar.

Esta expresión se reduce a la siguiente, cuando se conoce la eficiencia de los paneles solares, como es el caso de La Trinidad, Diriamba, donde este valor es de 15% y la relación $(RDF_{8-4} / RDF_{día}) = 0.86$.

$$EE_{(promdia/planta)} = 0.06 * (NIP_{(día)} + RDH_{(día)}) * A * (t_m/t_d) \quad \text{Ec. (9)}$$

En la Gráfica 11 se ha representado la energía eléctrica promedio que producirá la Planta Solar Fotovoltaica de La Trinidad, Diriamba, durante cada mes del año, con base a los datos que se presentan en la Tabla 6.

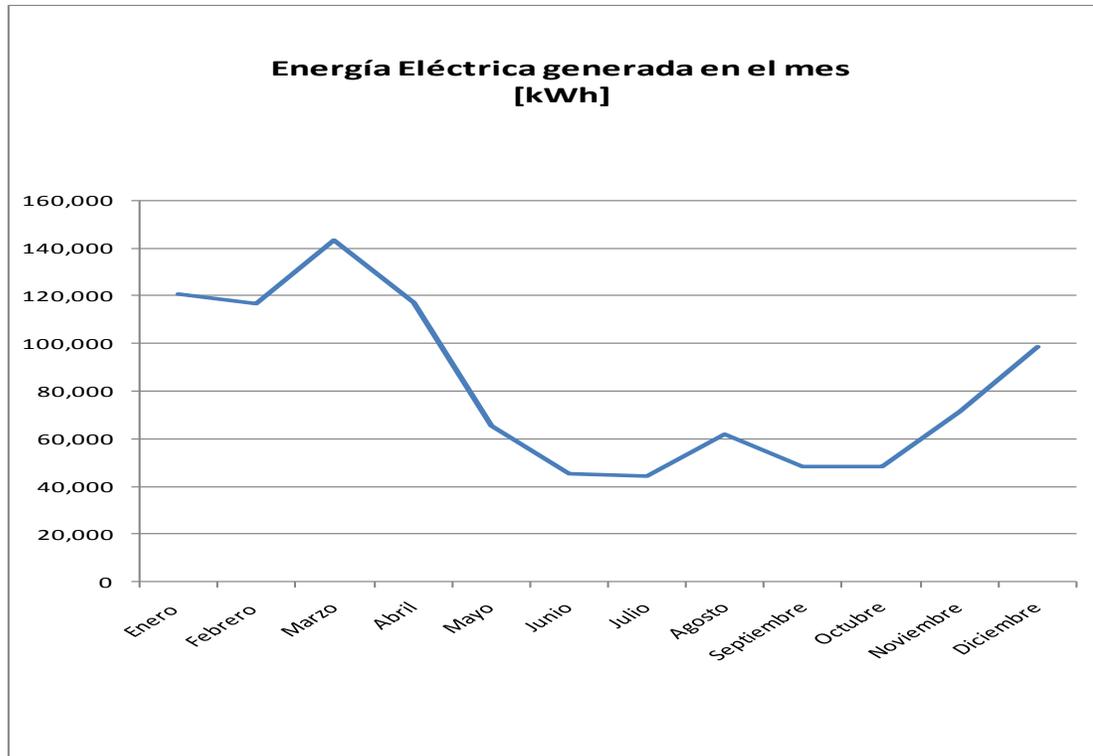


Gráfico 11. Energía Eléctrica Generada en cada Mes.

De acuerdo a estos datos, se puede afirmar que la Planta Solar Fotovoltaica en La Trinidad, Diriamba aportará en promedio una cantidad de energía anual equivalente a 981,771 kWh. En la estación seca (entre noviembre y abril) la cantidad de energía generada en promedio será de 667,245 kWh. Por el contrario en los meses de la estación húmeda o lluviosa (mayo a octubre), esta energía será aproximadamente en promedio de 314,526 kWh. Si se considera la energía que se generará en un día claro, esta será de 3,707 kWh, lo que equivale en promedio a 111,207 kWh en el mes. En la estación húmeda, en cambio, en un día totalmente nublado se generará una energía de 1,131 kWh, lo que representaría en un mes lluvioso y con mucha nubosidad una cantidad de energía equivalente a 33,941 kWh.

En resumen, se espera que el factor de planta de esta instalación durante el año sea de aproximadamente $981,771 \text{ kWh} / (900 \text{ kWp} * 8,760 \text{ h}) = 0.125$. Sin embargo, si se consideran solamente las horas de sol o iluminación en el día, lo que es la mitad de las horas del año, se tendrá entonces un factor de utilización durante el año de $981,771 \text{ kWh} / (900 \text{ kWp} * 4,380 \text{ h}) = 0.25$. Aparentemente este valor es relativamente bajo, sin embargo la proyección de energía habrá que constarse en la práctica durante la operación de la planta, para determinar la rentabilidad de la misma.

Con base a este gráfico se puede elaborar la curva de potencia anual de la Planta Solar Fotovoltaica, mes a mes, la cual se representa en la Gráfica 12.

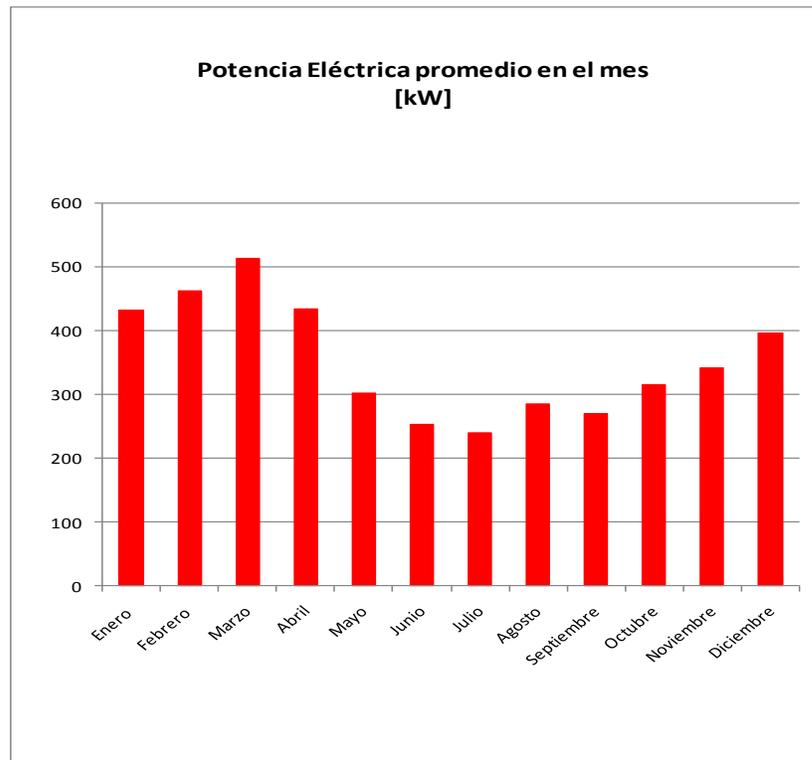


Gráfico 12. Potencia eléctrica promedio de la Planta Solar Fotovoltaica La Trinidad, Diriamba, en cada mes del año.

Este gráfico se ha obtenido de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_{e,prom} = EE_{(mes)} / t_{(radiación\ en\ mes)} \quad \text{Ec. (10)}$$

donde:

$P_{e,prom}$ Potencia eléctrica promedio en el mes

$EE_{(mes)}$ Energía eléctrica promedio en el mes

$t_{(radiación\ en\ mes)}$ Total de horas de radiación solar en el mes

El total de horas de radiación solar en el mes se ha representado en la Tabla 7.

La energía eléctrica producida está representada por el área bajo la curva de potencia eléctrica.

Si se analizan los datos de la Tabla 6, en lo que respecta a la potencia eléctrica promedio generada, se puede decir que en la estación seca o verano, en el tiempo comprendido entre las 8 am y las 4 pm, casi siempre se alcanzará en promedio el 81% de la potencia pico que pueden entregar los paneles, esto significa que por cada panel de 135 Wp se generaría una potencia eléctrica promedio de 110 W durante la estación seca. Respecto al total de la instalación, esto representa que en promedio durante la estación seca, la planta tendrá un potencia sostenida de 430 kW, en vista que la nubosidad es mínima, llegando a alcanzarse durante muchos días y a varias horas del día, la potencia pico de 900 kW.

En la estación húmeda o lluviosa, en cambio, prevalecerá la Radiación Difusa y la potencia eléctrica, en un día totalmente nublado, disminuirá notablemente, alcanzando un promedio mensual de alrededor de 277 kW, sin embargo, en algunos meses como mayo, junio y agosto, los valores promedios pudieran llegar a ser mayores, y en los meses de julio, septiembre y octubre, llegar a ser menores.

En la Tabla 7 se ha representado la potencia eléctrica pico o máxima, la promedio y la mínima que puede alcanzar la Planta Solar Fotovoltaica en La Trinidad, Diriamba, tanto en la estación seca como en la húmeda o lluviosa, considerando todas las premisas anteriores.

Potencia	Estación Seca	Estación Húmeda
Potencia máxima en kW	900	900
Potencia promedio en kW	430	277
Potencia mínima en KW	310	195

Tabla 7. Potencias pico en las estaciones seca y lluviosa.

12. OPERACIÓN DE LA PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA EN LA RED ELECTRICA NACIONAL

12.1 Despacho de carga y de potencia de un sistema eléctrico

Si los sistemas solares fotovoltaicos se conectan a la red eléctrica nacional, entonces deben igualmente cumplir con la Normativa Eléctrica Nacional para tales casos, pues se convierten en Agentes de Mercado y además deberán ser despachados por el Centro Nacional de Despacho de Carga (CNDC).

Aunque esta planta es menor de 1 MW, necesariamente por su ubicación deberá estar sujeto a la Normativa y a las disposiciones que oriente el CNDC.

Esta planta representa una potencia y una energía que son muy pequeñas comparadas con la capacidad instalada del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y los flujos de energía que éste maneja. El impacto de la planta dentro del mismo es casi irrelevante. No obstante, por estar inserto en el SIN, no debe permitirse su operación si no cuenta con todos los equipos necesarios de potencia, porque de lo contrario más bien la red nacional podría tener un gran impacto sobre la planta y dañarla.

Para inyectar electricidad al Sistema Interconectado Nacional, toda generación debe cumplir con los siguientes requisitos técnicos, de acuerdo a la Normativa Técnica Operativa del Sistema TDT, Anexo Técnico IV:

Voltaje

- Mantener el nivel de tensión dentro de un rango +/- 5% y +/- 10% del valor nominal.
- Para propósitos de diseño y unidades generadoras, los Agentes Productores deberán tener en cuenta que excepcionalmente el voltaje de la red podrá desviarse del valor nominal +/- 20% durante tiempo de 10 segundos .Deberá poder permanecer durante tres (3) minutos con una variación de la tensión entre el 10% y 20 % del valor nominal.

Frecuencia

- En condición de Operación Normal se debe de mantener la frecuencia dentro de un rango entre 59.8 y 60.2 Hz.
- En condición de Emergencia será mantener la frecuencia dentro de un rango 59.4 y 60.6 Hz por tiempo indefinido.
- Para propósitos de diseño de equipos y unidades, los Agentes Productores deberán tener en cuenta que excepcionalmente la frecuencia podría sobrepasar 63.0 Hz y caer por debajo de 57.00 Hz, excepto para motores de mediana velocidad que deberán tener en cuenta en su diseño que podrá sobrepasar 62.5 Hz y caer por debajo de 58.00 Hz .La unidad deberá poder mantener estos valores extremos no menos de 10 segundos.

13. CONCLUSIONES

1. El sitio La Trinidad, Diriamba está ubicado en la Zona del Pacífico de Nicaragua y los datos solares obtenidos en la Estación Actinométrica VADSTENA/UCA a lo largo de 22 años de mediciones, se pueden aplicar a este sitio sin tener mayores diferencias significativas.
2. La radiación solar que puede ser utilizada para fines de generación eléctrica es la que llega al suelo. Esta puede ser una radiación solar directa (NIP), si los rayos solares alcanzan la superficie de forma perpendicular, o bien una radiación directa horizontal, cuando los rayos no llegan de forma perpendicular al suelo (que es la mayoría de los casos).
3. La energía aprovechable está determinada por la temporada del año (seca o húmeda), la que a su vez está correlacionada con la inclinación del eje de la tierra con respecto a la eclíptica de la tierra; la cobertura de nubes (Octas); las condiciones climáticas propias del lugar y la eficiencia de los paneles solares, entre otros.
4. La generación de energía eléctrica, principalmente por la temporada del año, será mayor en la estación seca que en la estación húmeda.
5. La mayor generación de energía eléctrica se esperará en los meses de enero, febrero, marzo y abril. La menor generación de energía eléctrica se tendrá en los meses de junio, julio, septiembre y octubre.

6. Durante un día claro, la mayor radiación solar será de las 10:00 am a las 3:00 pm, y en forma de radiación solar directa horizontal o bien directa. En un día completamente nublado, la radiación será casi la misma a lo largo de todas las horas comprendidas entre las 8:00 am y las 4:00 pm, y es forma de radiación solar difusa.
7. La cobertura de nubes es determinante en la generación de electricidad. A menor cobertura de nubes (Octas igual o casi cero), la radiación será máxima y se correlaciona con el brillo solar. A mayor cobertura de nubes (Octas igual a 7 o mayor), la radiación solar es mínima e igualmente se correlaciona con el brillo solar.
8. La potencia eléctrica instantánea que generará la Planta Solar Fotovoltaica a lo largo de un día será variable, alcanzando su pico máximo entre las 10:00 am y las 3:00 pm.
9. La potencia eléctrica promedio mensual generada por la planta solar será distinta para cada uno de los meses del año. La energía eléctrica asociada a esta potencia eléctrica será igualmente distinta para cada uno de los meses del año.
10. Respecto a la potencia máxima que logre generar la planta eléctrica en un día determinado, ésta no afectará relevantemente al Sistema Interconectado Nacional (SIN), una vez que la planta opere. La potencia máxima (900 kW) solamente representa cerca del 0.2% de la demanda total del SIN.

- 11.El Factor de Planta resultante sería de 0.12, si se consideran todas las horas del año, incluyendo aquéllas en las que no hay iluminación o radiación solar. El Factor de Utilización sería de 0.25, valor que considera solamente las horas de iluminación o radiación solar en el año.

- 12.Los volúmenes de energía que generará la planta eléctrica serán manejables sin ningún problema por el Centro Nacional de Despacho de Carga (CNDC).

- 13.La energía renovable que se generará en un año es de aproximadamente 1, 555,200kWh. Esto significa que se pueden estar ahorrando al año un total de 97,200 galones de bunker (2,314 barriles), lo que a un costo promedio del bunker de US\$90/bbl, representaría un ahorro total en el año de US\$ 208,285.

12.RECOMENDACIONES

1. La Planta Eléctrica Solar Fotovoltaica debe instalarse de tal forma, que aproveche al máximo la radiación solar directa, para lo cual se recomienda que se instale bajo un ángulo sobre la horizontal que sea aproximadamente el correspondiente al paralelo sobre el que se encuentra la población de La Trinidad. La inclinación exacta deberá ser calculada por los diseñadores de la instalación. Según el criterio antes expuesto, este ángulo correspondería aproximadamente a unos 12°.
2. En vista que la radiación solar es la que genera electricidad, entonces esta planta deberá operarse por parte del CNDC a la carga que pueda entregar durante las horas de luz solar, lo que será principalmente en el período de las 8:00 am a las 4:00 pm. Esto significa que se tendrá una operación de característica diurna.
3. Dado que el principal aporte de esta planta, en términos energéticos, será su contribución al ahorro de combustibles fósiles, por lo consiguiente a la desde el punto de vista económico, al ahorro de divisas y también a reducción de emisiones contaminantes; entonces esta planta debiera operarse la mayor cantidad del tiempo disponible con luz solar. Esto implica que los mantenimientos se deben efectuar en horas de la noche.
4. Por otro lado, entendiendo que esta planta tendrán en la estación seca, un factor de planta cercano al 38%, y en la estación húmeda, en cambio, el factor de planta será de aproximadamente 17-20%, se recomienda por lo consiguiente, que no sea catalogada como una planta que entrega

potencia firme. Esto significa que para efectos de contratos de compra-venta de energía, no deberá existir más que un precio por la energía y ningún precio o cargo por potencia, en vista que esta no se puede garantizar. Así mismo, como es una instalación del Gobierno, no se debería tampoco aplicar ningún cargo adicional para recuperar la inversión.

5. Una vez instalada la planta y ésta entre en operación, se recomienda que se analicen los datos de energía y potencia entregados durante el período de un año, a fin de hacer las valoraciones pertinentes, tanto de manejo de la oferta de energía disponible en cada mes y el ahorro de combustible asociado.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. Radiación solar y atmosférica en Managua: 1998
Julio López de la Fuente S.
Cuaderno No 3.

2. Fundamentos de la Radiación Solar Tropical
Julio López de la Fuente.
Universidad Centroamericana.

3. Ministerio de Energía y Minas (MEM).
Consultoría SWERA.
Solar and Wind Energy Resource Assessment (April 2006).

4. Paneles Fotovoltaicos.
 - <http://www.portalsolar.com/energia-solar-paneles-solares.html>
 - <http://www.dforcesolar.com/>
 - www.SolarEnergy.org
 - www.icarus-solar.com
 - www.censolar.es

5. Introducción de energía limpia por Sistema de Generación de Electricidad Solar para la República de Nicaragua.
Japan International Cooperation System (JICS).
Oriental Consultants Co, Ltd.
Septiembre 2010.

