

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica



**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA,  
PARA EL USO DE LOS RESIDENTES DE LA FINCA EL PORVENIR**

**Trabajo de investigación presentado  
Por Carlos Asturias Padilla  
para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Mecánica**

**Guatemala**

**2007**



**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA,  
PARA EL USO DE LOS RESIDENTES DE LA FINCA EL PORVENIR**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica



**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA,  
PARA EL USO DE LOS RESIDENTES DE LA FINCA EL PORVENIR**

**Trabajo de investigación presentado  
Por Carlos Asturias Padilla  
para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Mecánica**

**Guatemala**

**2007**

## CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE GRÁFICOS	ix
RESUMEN	x
Capítulos	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Justificación	5
1.3. Objetivos	9
1.4. Estudio climático	9
1.5. Ventajas y desventajas de los sistemas fotovoltaicos	11
2. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA	13
2.1 Paneles fotovoltaicos	13
2.2 Sistema de baterías	16
2.3 Reguladores de carga	21
2.4 Inversor	24
2.5 Dimensionamiento del sistema	24
2.6 Diseño del sistema	28
3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	30
3.1 Instalación de los equipos	31
3.2 Instalación eléctrica	33

4. ESTUDIO ECONÓMICO	36
4.1 Costos	36
4.2 Estimación de la inversión	37
4.3 Costos de operación actual	37
4.4 Análisis costo beneficio	38
5. CONCLUSIONES	40
6. BIBLIOGRAFÍA	41
7. ANEXOS	43

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Listado de aparatos que consumen electricidad	8
1.1 Horas sol promedio por mes del período 1990 a 2003	10
2.1 Ciclos de vida de una batería fotovoltaica	18
2.2 Requerimientos energéticos de una vivienda	26
4.1 Costos componentes instalados	37
4.2 Costo anual de generación proyectado para las viviendas	38

## LISTA DE GRÁFICAS Y FIGURAS

Gráfica	Página
1.1 Comportamiento de la generación por tipo de recurso utilizado (2001-2006)	6
1.2 Mapa cobertura eléctrica 2006	7
1.3 Promedio de horas al mes de insolación en La Gomera, Escuintla del año 1990 a 2003	10
2.1 Comportamiento de potencia máxima en un día soleado	15
Figura	
2.1 Celda fotovoltaica	14
2.2 Componentes batería fotovoltaica	16
3.1 Diagrama funcionamiento sistema	31
3.2 Sistema fotovoltaico instalado	32
3.3 Banco baterías del sistema	33
3.4 Regulador de corriente	34

## RESUMEN

La cobertura eléctrica en Guatemala proyectada para el año 2006 es del 85.1% del territorio, pero aún con ese nivel de cobertura existe un 20% de poblaciones rurales en las que no se cuenta con cobertura eléctrica, debido a lo difícil del acceso que poseen éstas comunidades.

En la actualidad una de las alternativas para llevar energía eléctrica a estas comunidades es la energía fotovoltaica, la cual no poseen un elevado costo de instalación bajo a comparación de introducir el sistema a través de cableado.

Este proyecto tiene como objetivo la implementación de un sistema de energía fotovoltaica en las residencias de los empleados de la finca El Porvenir, situada en el municipio de La Gomera, departamento de Escuintla, donde debido a su situación geográfica y climática la hace una región apta para la instalación de éste tipo de sistema.

Actualmente el consumo de combustible es de Q10, 125.00 mensuales, del cual el 10% representa lo utilizado para generar electricidad para las residencias durante la noche.

Considerando la alternativa de seguir utilizando el mismo sistema o hacer la transición a un sistema fotovoltaico, se hizo un estudio de costos para un período de cinco años

### Resultados

Sistema fotovoltaico	Q.51,420.00
Motores de combustión	Q.63,229.09

Se pudo concluir que la inversión necesaria para el sistema fotovoltaico es más favorable y produce un ahorro a seguir utilizando los motores de combustión interna.

## 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia el ser humano ha sacado provecho de la energía proveniente del sol para su conveniencia y comodidad.

La dependencia del petróleo de varios países desarrollados, creó la necesidad de estudios e investigaciones con el objeto de crear fuentes alternas para cubrir sus necesidades energéticas. Esto tuvo como resultado el desarrollo del campo de la energía solar y otras fuentes alternativas de energía renovable. A lo largo de las últimas décadas la tecnología en el campo de la energía solar ha pasado de la fase experimental a una etapa en la que varias empresas se han establecido en el mercado para ofrecer una fuente de energía barata, renovable y no contaminante.

Durante los últimos años la cobertura eléctrica en Guatemala ha ido en aumento y de acuerdo con las últimas estadísticas presentadas por el Ministerio de Energía y Minas (2006), la cobertura del territorio nacional alcanza el 85.1%, pero admite que al menos 20% de las comunidades rurales no cuentan con energía eléctrica, debido al difícil acceso, ya que muchas de ellas se encuentran en zonas montañosas o pantanosas del país, haciendo que la instalación de la red eléctrica tenga un costo muy elevado.

Este proyecto tiene como finalidad realizar la implementación de un sistema de energía fotovoltaica en la residencia de los empleados de la Finca El Porvenir, situada en el municipio de La Gomera, departamento de Escuintla, donde debido a las características geográficas y climáticas la instalación de un sistema de este tipo se convierta en una opción viable.

En la primera parte del proyecto se presenta la información general del proyecto y un estudio climático de la zona.

La segunda parte está conformada por la información a cerca de los distintos equipos que existen en el mercado. Con los equipos se puede determinar cuál de ellos es el que mejor se adecua a las necesidades planteadas por los trabajadores.

La tercera parte del proyecto hace referencia a la implementación del sistema y cuáles son los beneficios que éste dará a las personas. Un análisis entre el ahorro que representa tener uno de estos sistemas y no estar en línea con la red eléctrica nacional.

En la cuarta parte se hace un análisis entre el ahorro que representa tener uno de estos sistemas y no seguir dependiendo del sistema de motores de combustión interna que hasta la fecha funciona.

### 1.1 Antecedentes

Las células fotovoltaicas son dispositivos compuestos por materiales sensibles a la luz de los cuales se desprenden electrones cuando la luz incide sobre ellos, con lo cual se logra convertir energía luminosa en energía eléctrica.

El efecto fue observado por primera vez en un material sólido (selenio) en 1877. Este material fue utilizado durante varios años para los fotómetros, que requerían de cantidades muy pequeñas de energía. Una comprensión más profunda de los principios científicos, fue provista por Albert Einstein en 1905 y Schottky en 1930, la cual fue necesaria antes de que las celdas solares eficientes pudieran ser diseñadas. Una celda solar de silicio convertía el 6% de la luz solar que incidía sobre ella en electricidad fue diseñada por Chapin, Pearson y Fuller en 1954, y esta es la clase de celda que fue utilizada en usos especializados tales como satélites orbitales a partir de 1958.

En su mayoría las celdas están compuestas de silicio puro con la adición de ciertas impurezas de elementos químicos, por lo regular son de color negro o azul oscuro lo que los hace capaces de generar corrientes que oscilan entre 2 y 4 amperios y un voltaje de 0.46 a 0.48V.

Las celdas solares de silicio disponibles comercialmente en la actualidad tienen una eficiencia de conversión en electricidad de la luz solar de cerca del 18%. Las celdas más recientes utilizan silicio amorfo y son conocidas como celdas de película delgada. Este tipo de silicio tiene la característica de absorber de mejor manera la luz solar y puede ser extremadamente delgado. También

puede adaptarse a otros materiales, tales como el vidrio o metal, en una forma adecuada, que permite una mayor generación.

Los módulos fotovoltaicos poseen un aspecto que se asemeja a un vidrio con una superficie que oscila entre 0.5 y 1m<sup>2</sup>, que son del mismo color que la celda. En la actualidad en el mercado se encuentran una gran variedad y cantidad de módulos, que van desde pequeños a grandes, rígidos o flexibles, en forma de placa, lámina o ventana; con soporte incorporado o no, soporte con orientación mecánica o automática y de distintas tonalidades (negro, azul, amarillo, etc...)

Para la producción de electricidad por medios fotovoltaicos existen esencialmente dos tipos de efecto fotoeléctrico. El primero de estos es el efecto fotoeléctrico externo, el cual ocurre cuando se emiten electrones libres desde la superficie debido a la absorción de fotones; mientras que el efecto fotoeléctrico interno consiste en la liberación de conductores de carga del material, debido a la absorción de fotones.

Una de las condiciones que debe existir para crear una célula solar utilizando el efecto fotoeléctrico interno, es que debe existir un campo eléctrico autogenerado. Este campo se forma debido a la unión de dos materiales semiconductores de diferente composición. El objetivo de esta unión de materiales diferentes, es que los electrones tiendan a moverse en una sola dirección y los agujeros en dirección contraria.

Los electrones presentes en este proceso también pueden adquirir energía de los núcleos positivos, debido a las fuerzas electrostáticas entre ambos. Estos núcleos, junto a los electrones presentes en nivel bajo de energía no pueden prescindir uno del otro. Esta combinación es conocida como iones. Estos iones conforman la estructura cristalina del sólido, la cual oscila alrededor de su posición inicial. A medida que la temperatura del sólido aumenta, las oscilaciones se incrementan y debido a esto también son transmitidas a los electrones. A una temperatura suficientemente alta, un número significativo de electrones adquieren suficiente energía que son capaces de migrar a la banda conductora, con lo cual la sustancia cambia de ser un aislante a un conductor. A

medida que la brecha de energía es mayor, los cambios únicamente se darán a temperaturas más altas cada vez.

Las celdas solares hoy en día son modulares, ya que se pueden colocar varias de ellas para formar grandes unidades y así obtener una mayor producción de energía. Estas son unidas mediante alambres conductores de corriente y son colocadas en una estructura para formar lo que se conoce como módulo solar, los cuales pueden ser unidos entre sí y formar una red fotovoltaica. La corriente generada por los módulos es directa, por lo cual puede utilizarse directamente en los lugares designados o simplemente puede ser almacenada en una batería para ser utilizada en un futuro y esta fácilmente puede ser convertida en corriente alterna para otro tipo de aplicaciones.

Entre algunas de las ventajas que poseen los sistemas fotovoltaicos, destacan la confiabilidad, facilidad de instalación y mantenimiento y la compatibilidad, ya que esta puede trabajar independientemente o en combinación con otras fuentes de energía como un sistema de apoyo.

Los costos de un sistema fotovoltaico en relación con otras fuentes de energía dependen de la localización y las dimensiones del proyecto, así como de que exista o no acceso a fuentes de energía en el lugar.

Usualmente el costo de producción de energía mediante un sistema fotovoltaico es alto durante el primer año de operación, pero este prácticamente se reduce a cero una vez que se hayan pagado los costos de capital, debido a que no hay gastos por combustible.

Como se puede observar ésta tecnología es perfectamente aplicable en los hogares de comunidades sin acceso a energía eléctrica. Colocando celdas solares en el techo de sus casas, a fin de recibir la radiación solar, estas pueden suministrar energía para todos los aparatos del hogar. Si se llegara a generar más energía de la necesaria, mediante medidores reversibles se puede retornar la energía a la instalación, la cual se podría utilizar para proporcionar energía a otras casas.

En general, los sistemas fotovoltaicos pueden tener las mismas aplicaciones que cualquier sistema generador de electricidad. Sin embargo, las

cantidades de potencia y energía que se pueden obtener de un sistema fotovoltaico están limitadas por la capacidad de generación y almacenamiento de los equipos instalados, especialmente de los módulos y la batería respectivamente, y por la disponibilidad del recurso solar. Técnicamente, un sistema fotovoltaico puede producir tanta energía como se desee; sin embargo desde el punto de vista económico, siempre existen limitaciones presupuestarias en cuanto a la capacidad que se puede instalar.

Dependiendo de su aplicación y de la cantidad y tipo de energía producida, los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- Sistemas individuales de corriente directa (CD) para aplicaciones domésticas.
- Sistemas individuales de corriente alterna (CA) para aplicaciones domésticas.
- Sistemas centralizados aislados de la red
- Sistemas centralizados conectados a la red.

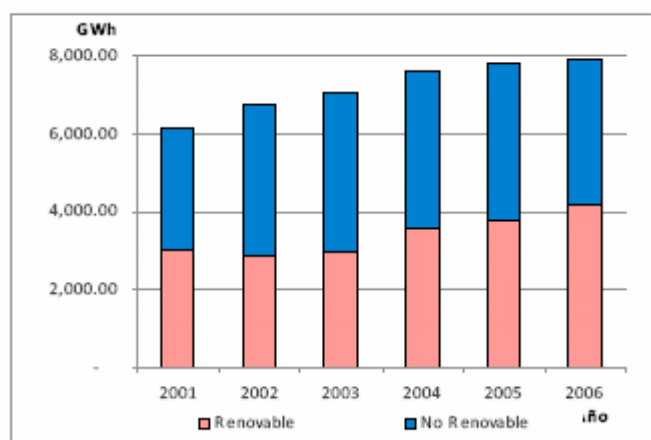
## 1.2 Justificación

Guatemala obtuvo una generación de electricidad durante el año 2006 mediante el Sistema Eléctrico Nacional de 7916.27GWh, de la cual el 41.3% de esta producción proviene de fuentes hidroeléctricas, seguida por la generación mediante motores de combustión interna, que representa el 29.6% de la generación de electricidad total del país. Aún con este volumen de producción, Guatemala no ha sido capaz de proveer servicio de energía eléctrica a más del 20% de la población en el área rural. Esto debido a que muchas de estas comunidades se encuentran en regiones montañosas o de jungla con baja accesibilidad, lo que hace que la instalación de la red eléctrica en estas áreas sea demasiado costosa.

Como se puede apreciar en la gráfica 1.1, la mayor fuente de generación en Guatemala son fuentes de energía no renovables, lo cual hace que las empresas generadoras se vean en la necesidad de incrementar su costo de

producción cada vez que haya un aumento en el precio del petróleo solo para poder seguir operando con normalidad. A pesar del potencial que se tienen para la generación hidráulica y otras fuentes alternas es poca la inversión que se ha hecho hasta el momento, lo cual hace que Guatemala posea una de las tarifas más altas por concepto de generación de electricidad en relación con otras naciones centroamericanas.

### Comportamiento de la generación por tipo de recurso utilizado (2001-2006)



Recurso	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Renovable	2,979.44	2,860.29	2,954.68	3,547.27	3,783.92	4,164.84
No Renovable	3,184.57	3,871.74	4,107.93	4,054.08	4,037.87	3,751.43
Total	6,164.01	6,732.03	7,062.61	7,601.35	7,821.79	7,916.27

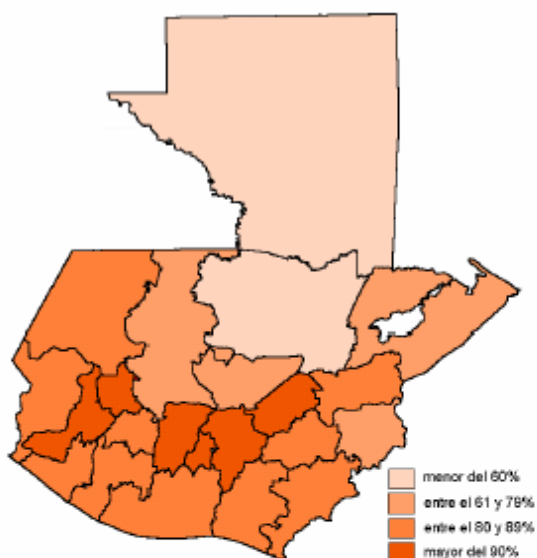
Fuente: MEM

Un ejemplo de ello, es la localización de la casa de los empleados de la finca El Porvenir, donde el tendido eléctrico de Empresa Eléctrica de Guatemala únicamente corre a lo largo de la carretera que conduce del municipio de La Democracia, Escuintla al municipio de Sipacate, lo cual hace que este número reducido de personas queden excluidas del sistema, ya que el casco de la finca,

donde se ubican las residencias, se encuentra a seis kilómetros de la carretera principal.

Como se puede apreciar en la gráfica 1.2 (Cobertura Nacional) el departamento de Escuintla cuenta con el 82.1% de cobertura eléctrica. La finca El Porvenir es uno de los tantos casos que se pueden encontrar en el departamento, donde la Empresa Eléctrica no ha sido capaz de llegar a cubrir las necesidades de los pobladores.

### Mapa de cobertura eléctrica año 2006



DEPARTAMENTO	%	DEPARTAMENTO	%
GUATEMALA	99.5	JUTIAPA	85.2
SACATEPÉQUEZ	98.9	ZACAPA	84.0
CHIMALTENANGO	95.4	HUEHUETENANGO	83.6
QUETZALTENANGO	93.2	JALAPA	82.3
EL PROGRESO	93.1	ESCUINTLA	82.1
TOTONICAPÁN	90.3	CHIQUIMULA	76.7
SOLOLÁ	88.4	IZABAL	71.9
SAN MARCOS	88.1	QUICHÉ	70.7
SANTA ROSA	87.9	BAJA VERAPAZ	68.1
SUCHITEPÉQUEZ	87.0	PETÉN	52.7
RETALHULEU	87.0	ALTA VERAPAZ	44.6

Fuente: MEM

Hasta el momento, las personas se benefician del servicio eléctrico a través de las plantas generadoras con las que cuenta la finca El Porvenir, las

cuales utiliza para la actividad de ordeño y equipo de refrigeración para la conservación de leche. En la actualidad, se cuenta con un total de tres plantas generadoras, siendo dos de éstas de respaldo, en caso de que la planta primaria tuviera desperfectos. Cada una de ellas posee una capacidad instalada de 35kVA. Los equipos poseen un motor diesel Cummins 4BTA3.9-G5, de cuatro ciclos, con turbo cargador.

Actualmente los equipos funcionan los 365 días del año, con un aproximado de nueve horas diarias, debido a que hay un ordeño por la mañana y otro por la tarde. El consumo promedio diario de diesel que utilizan éste sistema es de 15galones diarios, con lo cual el consumo mensual de combustible es alrededor de Q.10,000.00, donde éste valor fluctúa de acuerdo con el precio internacional del petróleo, haciendo que la utilización de éstos equipos para actividades fuera de lo normal incremente el consumo de combustible.

El incremento de los costos en los combustibles ha obligado a tomar la determinación de aplicar un racionamiento en la utilización de los equipos por la noche, con lo cuál los empleados se han visto afectados ya que luego de finalizar el ordeño de la tarde, y la leche ha sido recogida, la planta sale de línea hasta el día siguiente, dejando a las personas sin electricidad.

En la tabla # 1 se presenta una serie de aparatos electrodomésticos presentes en las viviendas de los empleados, en la cual se describe el consumo energético que cada uno de ellos representa.

Tabla 1. Listado de aparatos que consumen electricidad

Electrodoméstico	Potencia kW	Horas uso mensual	Consumo kWh/mes
Plancha	1.00	20.00	20.00
Licuada	0.40	1.50	0.60
Refrigerador	0.30	120.00	36.00
Televisor	0.08	195.00	15.60
Equipo Sonido	0.08	120.00	9.60

Lámpara Fluorescente	0.09	180.00	16.20
-------------------------	------	--------	-------

Es por ello que este trabajo, plantea la posibilidad de la implementación de un sistema de energía fotovoltaica para los trabajadores, ya que luego de consultar con ellos acerca de sus necesidades y hacer una evaluación de las residencias, cada residencia necesita de al menos nueve focos, y un tomacorriente por habitación dando un total de tres en total, para que ellos no dependan de la planta eléctrica durante la noche.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Generales:

- Desarrollar un sistema fotovoltaico, para cubrir las necesidades básicas de electricidad de los empleados de la finca El Porvenir.

#### 1.3.2 Específicos:

- Conocer las necesidades energéticas de los empleados de la finca El Porvenir.
- Determinar y analizar, la diferencia entre la inversión en un sistema fotovoltaico o continuar utilizando el generador eléctrico para proveer energía a los empleados.
- Determinar la rentabilidad del proyecto en un período de cinco años

### 1.4 Estudio climático

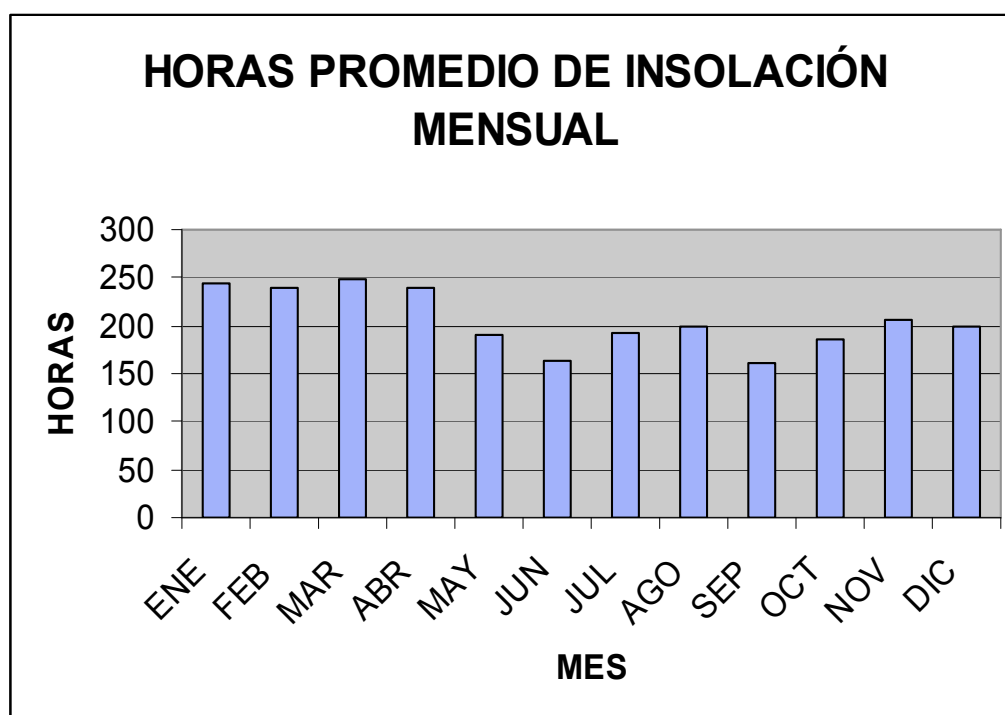
Debido a la localización que posee La Gomera, 13.983°N, 91.017°W, ésta posee un excelente potencial solar, con un promedio del índice de insolación anual de 5.3kWh/m<sup>2</sup>/día. Por estas características, los sistemas de iluminación fotovoltaicos se conviertan en una opción más viable para proveer de servicio eléctrico y satisfacer las necesidades básicas de iluminación, comunicación y entretenimiento de estas comunidades.

**Tabla 1.1 Horas sol promedio por mes del período 1990 a 2003**

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Hrs/sol mes	244.8	238.5	248.9	240.2	190.5	163.8	191.6	199.3	162.0	185.7	207.0	200.3
Hrs/sol día	7.90	7.69	8.03	7.75	6.15	5.29	6.18	6.43	5.23	5.99	6.68	6.46

Fuente: INSIVUMEH

**Gráfica 1.3 Promedio de horas de insolación por mes en La Gomera, Escuintla del año 1990 al 2003**



Esta variación en la cantidad de horas que el sol ilumina diariamente es debido al cambio en la altitud angular del sol y el cambio en la masa de aire a través de la cual viaja la luz del sol. Estos cambios hay que tomarlos en cuenta al momento de diseñar el sistema, ya que de ello dependerá que la eficiencia sea aún mejor.

### 1.5 Ventajas y desventajas de los sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos han demostrado su capacidad para proveer energía eléctrica a lugares aislados de la red convencional. Sin embargo, la tecnología fotovoltaica no es siempre la solución más adecuada a todos los problemas de electrificación rural. Dependiendo del caso particular, la extensión de la red eléctrica, el empleo de aerogeneradores o el uso de pequeñas centrales hidroeléctricas, pueden ser alternativas válidas. Antes de adquirir cualquier equipo se debe evaluar detenidamente si éste es la mejor opción o no a un caso particular. Incluso, ya tomada la decisión de utilizar un equipo fotovoltaico, el tipo de sistema que se instalará (CD, CA) es una decisión importante que se debe tomar a partir de las necesidades energéticas actuales y futuras y de la disponibilidad económica.

Entre algunas ventajas y desventajas que los sistemas fotovoltaicos presentan se pueden mencionar:

#### - Ventajas

- El área de La Gomera, Escuintla, dispone de abundante radiación solar.
- La tecnología fotovoltaica permite soluciones modulares y autónomas.
- La operación de los sistemas fotovoltaicos es amigable al medio ambiente.
- Los sistemas tienen una vida útil larga (más de 20 años)
- El mantenimiento de los sistemas es sencillo y tiene costos bajos.
- Los sistemas han experimentado una reducción de precios que los hace más accesibles.
- La tecnología de equipos y sistemas ha alcanzado un grado de madurez que posibilita su utilización para resolver problemas energéticos.

- La instalación de los sistemas fotovoltaicos individuales es simple, rápida y solo requiere de herramientas y equipos de medición básicos.
- Desventajas
- La cantidad de energía producida es limitada y alcanza solamente para las necesidades básicas de electricidad.
  - La disponibilidad de energía es variada y depende de las condiciones atmosféricas.

## 2. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA

### 2.1 Paneles fotovoltaicos

Las celdas fotovoltaicas que conforman el sistema, son el componente a través del cual se capta la energía proveniente de la radiación solar y la transforma en una corriente eléctrica, basándose en el efecto fotovoltaico el cual produce una corriente eléctrica cuando la luz incide sobre algunos materiales.

Las celdas solares se basan en el efecto fotovoltaico, en el cual la luz irradiada por el sol incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas que produce una diferencia de potencial entre las capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo a modo de producir trabajo útil.

2.1.1 Efecto fotovoltaico. Cuando los fotones chocan con las células fotovoltaicas, estos pueden ser absorbidos, reflejados o incluso pasar a través de la celda. Solo los fotones absorbidos pueden generar electricidad solar. Cuando es absorbido el fotón, la energía de este se conduce hacia un electrón de un átomo de la celda. Al generarse esta nueva energía, el electrón es capaz de transformarse y pasar a formar parte de una corriente en un circuito eléctrico. La corriente de electrones es creada en las capas de semiconductores de la celda solar.

Los semiconductores son tratados para que formen dos capas diferentes para formar un campo eléctrico, positivo y negativo. La corriente eléctrica se forma gracias a los electrones atrapados en el campo eléctrico, una vez que la luz se proyecta en la celda solar. Las celdas se encuentran fabricadas con materiales que actúan como aislantes con bajas temperaturas y como conductores cuando existe un aumento de energía.

## 2.1.2 Componentes

2.1.2.1 Marco de vidrio y aluminio. Este tiene la función de soportar mecánicamente a las celdas fotovoltaicas y de protegerlas de los efectos degradantes de la intemperie, por ejemplo: polvo, humedad. Todo el conjunto de celdas fotovoltaicas y sus conexiones internas se encuentran completamente aisladas del exterior por medio de dos cubiertas, una frontal de vidrio de alta resistencia a los impactos y una posterior de plástico EVA (acetato de vinil etileno)

El vidrio frontal es anti reflejante para optimizar la captación de rayos solares. El marco de aluminio tiene la función de facilitar la fijación adecuada de todo el conjunto a una estructura de soporte a través de orificios convenientemente ubicados.

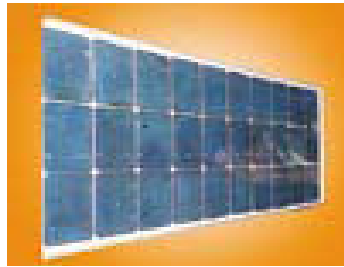


Fig. 2.1 Celda fotovoltaica

2.1.3 Tipos de módulos fotovoltaicos. En el mercado existe una amplia gama de fabricantes y modelos de módulos fotovoltaicos.

Según el tipo de material empleado para su fabricación, se clasifican en:

- Módulos de silicio mono cristalino: éstos son los más utilizados debido a su confiabilidad y duración, su precio es ligeramente mayor que los otros tipos.
- Módulos de silicio poli cristalino: son más económicos que los de silicio mono cristalino, pero su eficiencia es menor.
- Módulos de silicio amorfo: poseen una eficiencia inferior a los dos anteriores, pero su precio es menor. Son delgados y

ligeros, hechos en forma flexible, por lo que se pueden instalar como parte integral de un techo o pared.

La capacidad energética nominal de los módulos fotovoltaicos se indica en vatios pico (Wp), lo cual indica la capacidad de generar electricidad en condiciones óptimas de operación.

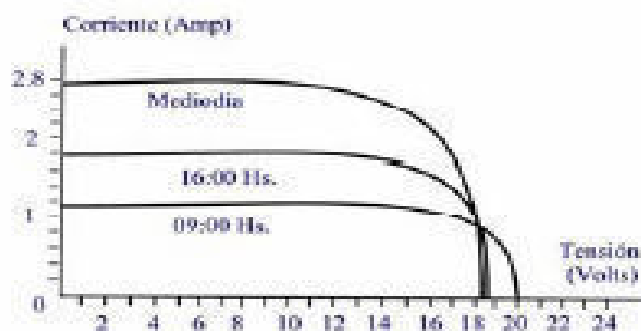
La capacidad real de un módulo fotovoltaico difiere considerablemente de su capacidad nominal, debido a que bajo condiciones reales de operación la cantidad de radiación que incide sobre las celdas es menor que bajo condiciones óptimas.

En el mercado, se pueden encontrar módulos fotovoltaicos de baja potencia, desde 5Wp; de potencia media 55Wp; y de alta potencia 160Wp. En aplicaciones de electrificación rural, suelen utilizarse paneles fotovoltaicos con capacidades comprendidas entre los 50 y 100Wp.

La vida útil de un panel fotovoltaico puede llegar hasta 30 años, y los fabricantes generalmente otorgan garantías de 20 o más años. El mantenimiento del panel solamente consiste de una limpieza del vidrio para prevenir que las celdas fotovoltaicas no puedan capturar la radiación solar.

La elección apropiada del tipo y capacidad del módulo fotovoltaico depende de las características propias de la instalación, tales como radiación solar existente y consumo energético requerido.

En la gráfica 2.1 se muestra el comportamiento de la potencia máxima de un panel solar durante un día soleado.



Gráfica 2.1 Comportamiento de potencia máxima en un día soleado

## 2.2 Sistema de baterías

Hoy en día existen diversas formas de almacenar energía fotovoltaica, entre las que se cuenta:

- Aire comprimido
- Hidrógeno
- Energía térmica
- Baterías electroquímicas

En este caso en particular se utilizarán baterías de plomo antimonio de electrolito líquido, debido a que poseen una baja auto descarga y un mayor número de ciclos de vida.

2.2.1 Ciclos de vida. Un ciclo es una descarga y carga de una batería a cualquier porcentaje de descarga. La cantidad de descarga de la batería (en porcentaje) comparada a su capacidad cuando está llena determina la necesidad para una carga pequeña, moderada o profunda. Esto es conocido como profundidad de descarga de la batería y está medida en porcentaje.

En la figura 2.2, se muestra un diagrama de los componentes de una batería utilizada para este tipo de aplicación.

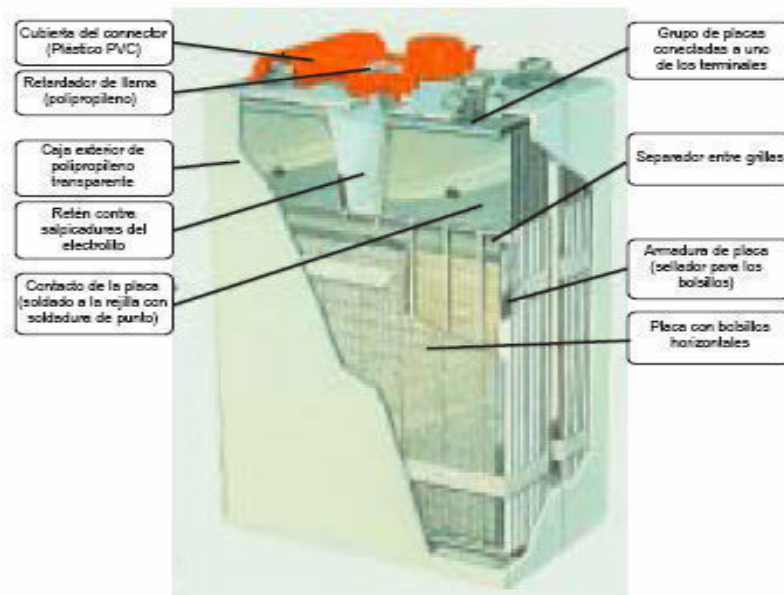


Fig. 2.2 Componentes batería fotovoltaica

Debido a que la radiación solar es un recurso variable, en parte previsible (ciclo día-noche), en parte imprevisible (nubes, tormentas); se necesitan equipos apropiados para almacenar la energía eléctrica cuando existe radiación y para utilizarla cuando se necesite. El almacenamiento de la energía eléctrica producida por los módulos fotovoltaicos se hace a través de las baterías. Estas baterías son fabricadas especialmente para sistemas fotovoltaicos.

Las baterías fotovoltaicas son un componente muy importante de todo el sistema pues realizan tres funciones esenciales para el buen funcionamiento de la instalación:

- Almacenan energía eléctrica en periodos de abundante radiación solar y/o bajo consumo de energía eléctrica. Durante el día los módulos solares producen más energía de la que realmente se consume en ese momento. Esta energía que no se utiliza es almacenada en la batería.
- Proveen la energía eléctrica necesaria en períodos de baja o nula radiación solar. Normalmente en aplicaciones de electrificación rural, la energía eléctrica se utiliza intensamente durante la noche para hacer funcionar tanto lámparas o bombillas así como un televisor o radio, precisamente cuando la radiación solar es nula. Estos aparatos pueden funcionar correctamente gracias a la energía eléctrica que la batería ha almacenado durante el día.
- Proveen un suministro de energía eléctrica estable y adecuado para la utilización de aparatos eléctricos. La batería provee energía eléctrica a un voltaje relativamente constante y permite, además, operar aparatos eléctricos que requieran de una corriente mayor que la que pueden producir los paneles (aún en los momentos de mayor radiación solar)

En su apariencia externa este tipo de baterías no difiere mucho de las utilizadas en automóviles. Sin embargo, internamente las baterías para aplicaciones fotovoltaicas están construidas especialmente para trabajar en ciclos de carga y descarga lentos.

Existen tres tipos de ciclos de descarga de las baterías, pequeño, moderado y profundo. Estos términos ayudan a comprender el tipo de ciclo que las baterías requerirán.

El ciclo pequeño ocurre cuando solo un pequeño porcentaje del total de la capacidad de la batería es descargado. Los ciclos moderado y profundo es donde las baterías son descargadas a un mayor porcentaje del total de la capacidad de la batería.

Uno de los factores más importantes para determinar los ciclos de vida de una batería, es la cantidad de descarga por ciclo. Cuando esta cantidad se incrementa por ciclo, resulta en una reducción del total de ciclos de la batería. En la tabla 2.1 se observan los ciclos de vida de una batería dependiendo de la descarga por ciclo de la misma.

% de Descarga	Ciclos de vida
25	2200
50	1000
75	550
100	325

Tabla 2.1 Ciclos de vida de batería

Las baterías para sistemas fotovoltaicos generalmente son de ciclo profundo, lo que significa que pueden descargar una cantidad significativa de la energía cargada antes de que requiera recargarse. En comparación, las baterías de automóviles están construidas especialmente para soportar descargas breves pero superficiales durante el momento de arranque; en cambio, las baterías fotovoltaicas están construidas especialmente para proveer durante varias horas corrientes eléctricas moderadas.

La capacidad de la baterías se mide en amperio hora (A-h), una medida comparativa de la capacidad de una batería para producir corriente. Dado que la cantidad de energía que una batería puede entregar depende de la razón de descarga de la misma, los A-h deben ser especificados para una tasa de descarga en particular. La capacidad de las baterías fotovoltaicas en Ah se especifica frecuentemente a una tasa de descarga de 100 horas (C100).

La capacidad de la batería para un sistema fotovoltaico determinado se establece dependiendo de cuanta energía se consume diariamente, de la cantidad de días nublados que hay en la zona y de las características propias de la batería por utilizar. Para la elección de la batería hay que tomar en consideración la tensión nominal proveniente de la suma de las tensiones nominales de todos los elementos que componen el sistema. En la descarga de la batería hay que tomar otra serie de factores que influyen en la decisión del tipo de batería escogido, entre los que resaltan:

- El tiempo de descarga a una intensidad determinada
- Intensidad de descarga en un tiempo determinado
- Grado de descarga. Porcentaje de carga que ha sido utilizado. En instalaciones fotovoltaicas se recomienda utilizar un 40% en sistemas que no requieren de mayor mantenimiento.

La batería a utilizar debe ser escogida en base a su capacidad nominal, que no es más que la carga eléctrica que la batería es capaz de almacenar. Esta capacidad dependerá de:

- Régimen de carga y descarga
- Temperatura
- Número de ciclos acumulados.

El final de la vida útil de una batería se alcanza cuando su capacidad se reduce al 80% de la capacidad nominal.

Otros factores que influyen en la elección de las baterías es la determinación del tiempo de autonomía, ya que en instalaciones fotovoltaicas la

capacidad de las baterías suele ser entre 3 y 8 veces la energía consumida en un día o ciclo de utilización. También influye la tensión mínima al finalizar la descarga y la corrección de la capacidad según el régimen de descarga, el porcentaje de descarga máxima, la temperatura y el decrecimiento de la capacidad con los ciclos de funcionamiento.

Además, se recomienda utilizar, cuando sea posible, una sola batería con la capacidad necesaria. El arreglo de dos o más baterías en paralelo presenta dificultades de desbalance en los procesos de carga y descarga. Estos problemas ocasionan en ocasiones la inversión de polaridad de las placas y, por consiguiente, la pérdida de capacidad de todo el conjunto de baterías. También es recomendado hacer la instalación de las mismas en una habitación con buena ventilación y aislada de la humedad del suelo. Durante el proceso de carga se produce gas hidrógeno en concentraciones no tóxicas, siempre y cuando la habitación disponga de ventilación.

Después que las baterías alcanzan su vida útil, deberán ser retiradas y llevadas a centros de reciclaje y por ningún motivo deben desecharse en campos abiertos o basureros, pues el derrame de la solución de ácido sulfúrico que contienen ocasiona daños al suelo, personas y animales. Finalmente, es importante mantener alejados a los niños de las baterías para evitar cortocircuitos o quemaduras de ácido accidentales.

2.2.2 Mantenimiento y vida útil. Diferentes tipos y modelos de batería requieren diferentes medidas de mantenimiento. Algunas requieren la adición de agua destilada o electrolito, mientras que otras, llamadas baterías sin mantenimiento, no lo necesitan.

Generalmente, la vida útil de una batería de ciclo profundo es entre 3 y 5 años, pero esto dependerá en buena medida del mantenimiento y de los ciclos de carga y descarga a los que fue sometida. La vida útil de una batería llega a su fin cuando esta se descarga súbitamente debido a un corto circuito entre placas o bien cuando ésta pierde su capacidad de almacenar energía debido a la pérdida de material activo de las placas.

Las baterías utilizadas en aplicaciones fotovoltaicas son elementos bastante sensibles a la forma como se realizan los procesos de carga y descarga. Si se carga una batería más de lo necesario, o si se descarga más de lo debido, ésta se daña. Normalmente, procesos excesivos de carga o descarga tienen como consecuencia que la vida útil de la batería se acorte considerablemente.

Para que el sistema de acumuladores funcione adecuadamente es necesario que el perfil de generación no sea igual al de consumo de cada residencia, ya que de ser así las baterías sufrirán un desgaste mayor disminuyendo así su vida útil.

Debido a que el buen estado de la batería es fundamental para el funcionamiento correcto de todo el sistema y que el costo de la batería puede representar hasta un 15-30% del costo total, es necesario disponer de un elemento adicional que proteja la batería de procesos inadecuados de carga y descarga, conocido como regulador o controlador de carga.

### 2.3 Reguladores de carga

Este es un dispositivo electrónico, que controla tanto el flujo de la corriente de carga proveniente de los módulos hacia la batería, como el flujo de la corriente de descarga que va desde la batería hacia las bombillas y demás aparatos que utilizan electricidad. Si la batería ya está cargada, el regulador interrumpe el paso de corriente de los módulos hacia ésta y si ella ha alcanzado su nivel máximo de descarga, el regulador interrumpe el paso de corriente desde la batería hacia las bombillas y demás cargas.

La interrupción del paso de corriente se puede realizar de dos formas, las cuales dan lugar a los reguladores en serie y paralelo.

2.3.1 Reguladores en serie. Los reguladores en serie tienen la función de interrumpir el paso de corriente desde el panel hacia las baterías cuando se logra un estado de plena carga. Esto es equivalente a un conmutador conectado en serie que proporciona una vía de baja resistencia desde el grupo de paneles

al sistema de baterías durante la carga y un circuito abierto entre ambos cuando las baterías se encuentran plenamente cargadas.

Como elemento regulador se emplea un dispositivo semiconductor (normalmente transistores de potencia bipolar) capaz de conducir la corriente deseada en la carga, de soportar la diferencia de tensión entre la entrada y la salida y que está provisto de un sistema térmico capaz de ceder al ambiente el calor generado por la pérdida de potencia, sin alcanzar una temperatura peligrosa para la estructura.

Este elemento es gobernado por un circuito de control que, compara constantemente la tensión de las baterías con una tensión de referencia, entregando al regulador una señal para permitir o impedir el paso de corriente.

En los reguladores en serie, la energía sobrante, disipada intencionalmente en forma de calor, aumenta en proporción directa con la carga a que es sometida la fuente.

2.3.2 Reguladores en paralelo. Los reguladores en paralelo detectan la tensión en los bornes de la batería y cuando el potencial alcanza un valor preestablecido crean una vía de baja resistencia para el grupo de paneles fotovoltaicos, derivando con ello la corriente y apartándola de las baterías. Un diodo en serie, interpuesto entre el regulador y la batería, impide que la corriente de la batería retorne a través del regulador o del panel. Los reguladores en paralelo disipan toda la corriente de salida del panel cuando el sistema de baterías alcanza el estado de plena carga. Otra característica de estos reguladores es que impiden las variaciones de corriente proveniente de la carga aparezca en la fuente primaria lo que proporciona una facultada de aislamiento.

En estos reguladores, la energía disipada en el regulador disminuye cuando aumenta la carga. Además el regulador en paralelo a comparación del regulador en serie presenta un elemento más que también disipa calor, una resistencia, por la que circula las corrientes del regulador y de la carga. Esto provoca que para una entrada y salida determinada y una carga idéntica, la fuente primaria del regulador en paralelo entrega una potencia constante que, independientemente de que se disipe en el elemento regulador o en la carga, es

siempre mayor a la que es entregada a un regulador en serie en las mismas condiciones si se exceptúa el caso de carga máxima con entrada mínima, en que ambas fuentes disipan la misma potencia. Es por ello, que el regulador en paralelo posee un rendimiento inferior a su equivalente en serie.

De acuerdo con estas consideraciones, el regulador en serie es el más empleado relegando el uso de reguladores en paralelo en aplicaciones a niveles energéticos muy bajos en los que no es importante perder una parte de la energía generada y en aquellas en las que es muy importante la interacción entre equipos o secciones del mismo alimentadas por la misma fuente primaria.

Desde el punto de vista de protección del equipo, en caso de sobrecarga los reguladores en serie reciben el impacto directo de ella y son, por tanto, son frágiles, lo que no ocurre con los reguladores en paralelo.

Entre las funciones que tienen este dispositivo se encuentran:

#### 2.3.3 Evitar la descarga hacia el panel en oscuridad

- Abre el circuito automáticamente.
- Utiliza diodos de bloqueo. El diodo de bloqueo introduce una caída de tensión apreciable en la carga.

#### 2.3.4 Evita tensiones de carga elevadas

- Disipa el exceso de corriente que proviene del panel mediante un limitador de tensión

#### 2.3.5 Evita sobrecargas

- Desconecta el receptor cuando el nivel de carga de la batería alcanza el umbral máximo.

Los conductores a utilizar deben poseer la característica de no sobrecalentarse, tampoco deben producir una caída de tensión que provoque el mal funcionamiento del sistema. Las pérdidas por el efecto Joule deben ser bajas (menor al 5% de la potencia instalada), esto debido a que se trata de una instalación con bajo nivel de tensión.

El sistema debe ser diseñado para que posea protecciones térmicas y/o magnéticas para minimizar el riesgo de sobre intensidades de corriente en las baterías y conductores. Todas las partes metálicas de los dispositivos instalados deben estar aterrizadas para evitar sobre tensiones en el sistema, esto debido a que la zona es propensa a descargas atmosféricas en la época de invierno.

## 2.4 Inversor

El inversor provee adecuadamente la energía eléctrica en forma eficiente y segura para la instalación y las personas, también ayuda a regular la cantidad y el tipo de energía que se necesita.

El tipo de energía se refiere al comportamiento de los valores de voltaje y corriente con los que se suministra la energía. Algunos electrodomésticos, como lámparas, radios y televisores operan a 12 V de corriente directa y por lo tanto pueden ser energizados a través de una batería cuyo voltaje se mantenga constante alrededor de 12V.

También existen otra serie de electrodomésticos que necesitan 110V ó 120V de corriente alterna para funcionar. El voltaje en el tomacorriente, el cual posee corriente alterna, fluctúa periódicamente a una razón de 60 ciclos por segundo (Hz), pero su valor efectivo es equivalente a 120V.

Los módulos fotovoltaicos proveen corriente directa a 12V ó 24V por lo que se requiere de un inversor, para que transforme, a través de dispositivos electrónicos, la corriente directa a 12V de la batería en corriente alterna a 120V.

## 2.5 Dimensionamiento del sistema

Un sistema fotovoltaico incluye cargas o aparatos eléctricos que se utilizan y que consumen la corriente generada o almacenada.

La selección de estas cargas es tan importante como la del resto de equipos fotovoltaicos; por ello, hay dos aspectos por considerar cuando se utilizan aparatos que serán energizados a través de un sistema fotovoltaico:

2.5.1 Consumo diario. El consumo de energía del conjunto de aparatos eléctricos no debe sobrepasar la cantidad de energía diaria producida por el

sistema fotovoltaico. Es importante recordar que la disponibilidad diaria de energía eléctrica de los sistemas fotovoltaicos es variable ya que depende de la radiación solar disponible, del estado de carga de la batería y de la capacidad de los equipos instalados, especialmente de la capacidad total de los módulos fotovoltaicos. Por lo tanto, la energía disponible es limitada y hay que utilizar racionalmente los aparatos según ésta.

2.5.2 Necesidad de un inversor. La necesidad de utilizar aparatos de 120V determina la instalación o no de un inversor. Es importante tener en cuenta el tipo de energía que necesitan los aparatos eléctricos que se van a utilizar con el fin de determinar si es necesario o no un inversor. En la decisión hay que tomar en cuenta que el inversor implica un costo adicional al sistema y que en el mercado se ofrecen varios electrodomésticos que funcionan a 12V.

La suma instantánea de las potencias individuales de cada uno de los aparatos a emplear no debe ser mayor que la capacidad máxima en vatios (W) del inversor. En el caso de necesitar un inversor, es recomendable utilizar inversores construidos específicamente para aplicaciones fotovoltaicas y sobredimensionar la capacidad de éstos en un 20-30% para prevenir expansiones futuras en la instalación.

La utilización de un inversor no impide el uso de electrodomésticos de 12V de corriente directa. Por lo tanto, una instalación fotovoltaica que disponga de un inversor puede proveer energía tanto a cargas de 12V como a cargas de 120V.

Para el dimensionamiento adecuado del sistema se parte de la demanda, tomando en consideración una serie de factores, resumidos a continuación:

- Rendimiento de la batería (80% aproximadamente)
- Rendimiento del inversor (90% aproximadamente)
- Pérdidas en los conductores. La demanda total es dividida por el rendimiento energético de la instalación (97% aproximadamente)
- Determinación de la superficie de las placas y la capacidad de acumulación.

Los cálculos para este sistema se basan en el sistema de horas sol pico, el cual es el número de horas de sol que, en condiciones estándar, aportan la misma cantidad de energía que la recibida en un período de tiempo considerado con anterioridad.

En principio el sistema será instalado en tres residencias de los trabajadores de la Finca el Porvenir, las cuales tienen un área total de construcción de 49.16m<sup>2</sup>, de los cuales 5.75m son de frente y 8.55m de fondo. La residencia se divide en dos dormitorios, sala, comedor, cocina, baño. La construcción es de block y cemento, sin trabajo de repello en las paredes, piso de concreto y con techo de lámina.

La demanda requerida por cada una de las residencias de los empleados se resume a continuación:

- Ocho bombillas fluorescentes de baja intensidad de 7W.
- Equipo de sonido que consume 80W
- Equipo variado que no se utiliza a diario 60W

Cada uno de estos componentes opera por distintos lapsos de tiempo por lo que el requerimiento final de energía se calcula de la siguiente forma:

Tabla 2.2 Requerimientos energéticos de una vivienda

Cantidad	Potencia equipo (W)	Horas uso (h)	Consumo (W-h)
8	7	4	224
1	80	2	160
1	60	2	120
		<b>Total</b>	<b>504</b>

Capacidad requerida:

$$\frac{\frac{W - \text{horatotal}}{\text{semana}}}{7 \text{ días}} = \frac{3528 Wh}{7} = 504 Wh / \text{día}$$

Para obtener los amperios hora necesarios para el sistema, se divide la capacidad requerida entre el voltaje nominal de la batería

$$\frac{504 Wh}{12 V} = 42 Ah$$

Estos amperio hora obtenidos son un valor teórico, para obtener un valor de uso, este valor debe ser dividido dentro de la eficiencia de la batería

$$\frac{42 A}{0.9} = 46.6667 Ah$$

A los 46.67 A-h que necesita la batería para su funcionamiento, también hay que agregarle las pérdidas generadas por el inversor de corriente que representan un 15%. Es por ello que el valor en amperio hora es dividido por 85% que es la eficiencia del inversor

$$\frac{46.6667 Ah}{0.85} = 54.902 Ah$$

Finalmente, ya habiendo considerado las eficiencias tanto de la batería como del inversor, también se deben tomar en cuenta las pérdidas por concepto del cableado utilizado para realizar la instalación, éstas son del 3% del valor antes establecido

$$\frac{54.902 Ah}{0.97} = 56.60 Ah$$

El amperaje requerido para el sistema, viene dado por el valor en amperio hora dividido el promedio de horas sol en un día que recibe La Gomera, Escuintla

$$\frac{56.60 Ah}{6.65 h} = 8.511 A$$

Debido a que las baterías no deben descargarse más allá del 80% de su capacidad, es recomendable que el régimen de descarga de las mismas sea aproximadamente el 80% del valor máximo de descarga, es por ello que para obtener los amperios de la batería a ser utilizada se calcula por los amperios hora, divididos por un factor de 80%

$$\frac{56.60 Ah}{0.8} = 70.750 Ah$$

Como el sistema utilizará dos baterías, y cada una requiere de 70.75A-h, el requerimiento final del sistema será

$$70.750 Ah \times 2 = 141.50 Ah$$

## 2.6 Diseño del sistema

Para cumplir con la demanda energética calculada para cada residencia se utilizarán paneles solares marca Kyocera, modelo KC85T, los cuales poseen las siguientes características:

- Potencia máxima: 87W
- Voltaje máximo del sistema: 600V
- Voltaje máximo de uso: 17.4V

- Corriente máxima: 5.02A
- Dimensiones: 39.6"x25.7"x2.2"

En este caso debido a que el sistema necesita 8.51A para su funcionamiento, se utilizarán dos paneles KC85T conectados en paralelo, que en conjunto proveerán 10.04A, lo cual es suficiente para alimentar el sistema y aún así mantener un valor de respaldo adecuado, con lo cual no se restrinja el uso de aparatos electrodomésticos por parte de los residentes.

El banco de baterías a ser utilizadas son marca Trojan, modelo 27AGM, cuyas características son:

- Tasa de descarga a 5h: 76Ah
- Tasa de descarga a 20h: 100Ah
- Dimensiones: 12"x6 5/8"x9 3/16"

En este caso, la batería seleccionada posee una capacidad de descarga de 100A-h. El régimen de descarga de la batería no debe sobrepasar del 80% de su capacidad, lo cual para el sistema representa 70.75A-h.

Debido a que el sistema consta de dos paneles conectados en paralelo, los cuales producen 10.04A para su funcionamiento, es necesario emplear dos baterías de 100A-h conectadas en paralelo, esto para compensar el valor total de la descarga total del sistema, que ahora es 141.50A-h.

Al utilizar dos baterías conectadas en paralelo, el sistema tendrá una capacidad instalada de 200A-h, basándose en que el régimen de descarga de la batería es de 20h, con la cual se está garantizando un suministro continuo durante las horas de mayor demanda y la prolongación de la vida útil de la batería ya que ésta trabajará con un margen adecuado de operación y no cerca del valor crítico de descarga de 70.75A-h de la misma.

### 3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

El proyecto piloto, contempla la instalación de sistemas fotovoltaicos en tres residencias, el cual debe garantizar el suministro estable de energía eléctrica para la iluminación de la residencia, equipo variado, entre los que se puede mencionar plancha, licuadora y un equipo de sonido (tabla 1.1)

En este caso se estará utilizando un sistema individual de corriente directa, para aplicaciones domésticas. El equipo para cada casa consta de una potencia máxima de 504Wh en paneles fotovoltaicos de 87Wp, un banco de baterías de 100A-h, un inversor de 12V DC/ 110 AC de 700 W, un controlador de carga de 12V.

Las características sobresalientes de este tipo de sistema son:

- El voltaje nominal es 12V corriente directa (CD):

Esto implica que solamente se pueden utilizar bombillas y electrodomésticos que trabajen a 12V. Es importante mencionar que, aunque existe una gran variedad de bombillas, puede ser difícil adquirir este tipo en el comercio local. Normalmente, es necesario contactar a los distribuidores del equipo para comprarlas y esto representa inconvenientes en los tiempos de entrega y de costos más altos.

- Debe ser utilizado exclusivamente para satisfacer necesidades básicas de electrificación, ya que los equipos son de baja capacidad; debido a que el sistema trabaja a 12V. Por estas razones, el costo inicial del sistema es menor y atractivo para soluciones básicas de electrificación rural.

El sistema debe realizar cuatro funciones fundamentales:

- Transformar de forma directa y eficiente la energía solar en energía eléctrica.
- Almacenar adecuadamente la energía eléctrica generada.

- Proveer adecuadamente la energía producida (consumo) y almacenada.
- Utilizar eficientemente la energía producida y almacenada.

Siguiendo el orden antes descrito, en la figura 3.1 se muestran los componentes del sistema fotovoltaico encargados de realizar éstas funciones específicas son:

- Paneles fotovoltaicos
- Batería
- Regulador de carga
- Inversor
- Cargas de aplicación

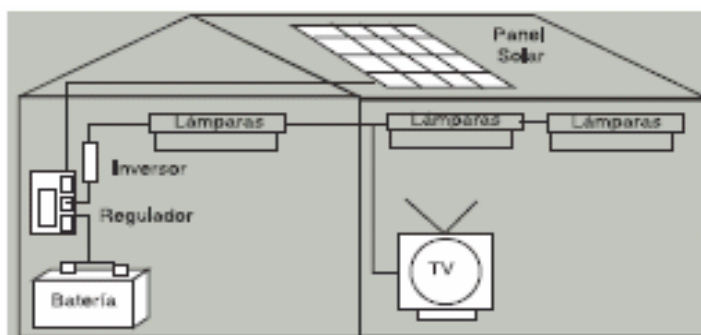


Fig. 3.1 Diagrama de funcionamiento del sistema

### 3.1 Instalación de los equipos

Un aspecto importante en la instalación de los equipos, era el asegurar de que no existiera ningún obstáculo que les pudiera dar sombra, al menos durante las horas pico del día (vegetación, construcciones, otros módulos, etc.)

Previo a la instalación se observaron las posiciones del Sol al amanecer, mediodía y al atardecer, es por ello que para aprovechar la mayor cantidad de luz solar durante el año, la orientación de los paneles se hizo orientada hacia el Ecuador.

La inclinación óptima de los módulos esta dada por:

- La latitud del lugar donde se instalaron.

- Tipo de instalación realizada, en este caso aislada de la red eléctrica.

Debido a que se trata de una instalación aislada, se debía asegurar el suministro de electricidad a lo largo del año, por lo que se buscó la manera de perseguir la máxima captación solar durante los meses de invierno, sin necesidad de modificar el sistema. Para asegurar la captación en esos meses los módulos debían ser inclinados  $10^\circ$  más que la latitud, con lo cual se logra compensar la inclinación respecto al invierno ecuatorial, en este caso la latitud es de  $13.983^\circ\text{N}$  por lo que el ángulo utilizado fue de  $25^\circ$ , con lo que se aseguró el suministro continuo de radiación solar.

Debido a que los paneles fueron instalados en el techo de la residencia, fueron asegurados de tal manera que no pudieran caerse a consecuencia de fuertes vientos o lluvias que pudieran afectar la región.

Los paneles necesitan de una ventilación adecuada en la parte posterior, para asegurar el funcionamiento adecuado y así evitar daños por condensación, es por ello que el módulo requiere de una corriente de aire a través de esta área.

Al realizar la instalación, se aseguró en dejar una distancia suficiente entre la parte posterior del módulo y la superficie de montaje. En este caso la distancia utilizada fue de 2in.

En la figura 3.2 se puede observar el módulo fotovoltaico ya instalado en el techo de una de las residencias.



Fig. 3.2 Sistema fotovoltaico instalado

### 3.2 Instalación eléctrica

En este caso como es un sistema con cargas bajas, se utilizó un cableado en paralelo.

La buena disposición del cableado, garantiza un funcionamiento confiable del sistema fotovoltaico a largo plazo. Para esto hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Mantener la extensión de los cables lo más corta posible, para reducir la pérdida de eficiencia y voltaje.
- Como en este caso hay dos paneles juntos, el cableado fue asegurado al marco de soporte de los mismos.

Durante el proceso de instalación la superficie de los paneles fue cubierta con un material opaco, esto con el objetivo de evitar el proceso de captación de radiación solar antes de haber terminado completamente la instalación.

Previo a conectar el cableado a las baterías, se revisó que la polaridad de las baterías fuera el adecuado para la aplicación, ya que de lo contrario se hubiesen podido presentar los siguientes casos:

- Daño al diodo de derivación en el módulo.
- Riesgo de explosión debido a una generación excesiva de gas en la batería.

En la figura 3.3 se muestra el sistema de baterías ya conectado al sistema.



Fig. 3.3 Banco de baterías del sistema

En la figura 3.4, se muestra el regulador de corriente instalado, el cual cuenta con tres luces indicadoras, cuyas funciones se describen a continuación:

- Luz verde: ésta indica la disponibilidad de luz solar para la carga de la batería.
- Luz roja, es utilizada para tres funciones diferentes:
  - o Desconexión automática de carga por baja tensión. Esto ocurre cuando el voltaje de la batería cae por debajo del valor prefijado. Usualmente la luz se apagará cuando la batería cargue a cerca del 50% de su capacidad, al llegar a este punto la carga será automáticamente restablecida.
  - o Arranque inicial del controlador.
  - o Confirmar la selección del control de iluminación.
- Luz ámbar: ésta indica que la disponibilidad de carga en la batería es baja y que el sistema cerca de dejar de operar.



Fig.3.4 Regulador de corriente

Este regulador posee la característica de que se pueden programar el número de horas que el sistema debe funcionar. A continuación se presenta la opción utilizada que cumple con los requerimientos de los empleados:

- OFF, las luces quedan apagadas por completo.
- 2, 4,6 número de horas que se necesita electricidad después de la puesta del sol.

- 3/1,4/2,6/2 el sistema funciona después de la puesta del sol, se apaga durante la noche y enciende una o dos horas antes del amanecer.

Previo a la puesta en funcionamiento del sistema, se verificaron los siguientes parámetros:

- Voltaje de circuito abierto de cada uno de los circuitos. El valor obtenido debía coincidir con la suma de los voltajes de circuito abierto de los módulos individuales.
- La corriente de cortocircuito de cada circuito de la serie con radiación solar directa.

Este valor puede variar, dependiendo de las condiciones climáticas, la hora del día y el nivel de sombra en el módulo.

## 4. ESTUDIO ECONÓMICO

### 4.1 Costos

La inversión necesaria para adquirir un sistema fotovoltaico depende de varios factores, entre los que destacan: los precios internacionales del mercado fotovoltaico, la disponibilidad local de distribuidores e instaladores de equipo fotovoltaico, la ubicación y demanda energética de los usuarios. Las características particulares de todos los equipos necesarios para satisfacer la demanda energética (en calidad, cantidad y capacidad) la distancia y la facilidad de acceso entre el lugar de venta de los equipos y el lugar donde será instalado el sistema, y los márgenes de ganancia de vendedores e instaladores de equipos (generalmente 10-30%), son factores que determinan el monto de la inversión para hacer el proyecto de electrificación.

El costo inicial de un sistema fotovoltaico para aplicaciones domésticas oscila entre \$1800 y \$2200, el cual incluye los equipos y la instalación. Para este proyecto, los montos de mayor relevancia son un 78.9% correspondiente al módulo fotovoltaico e instalación, y un 13.7% a la batería, un 4.5% al inversor, mientras que el regulador representan 2.9% del costo.

Los costos totales de un sistema fotovoltaico pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Costos de inversión
- Costos de mantenimiento
- Costos de reemplazo

Los costos de inversión son aquellos en los que se debe incurrir para la compra, transporte e instalación de los equipos fotovoltaicos. Estos costos pueden representar un 70-75% del costo del sistema a lo largo de su vida útil. La vida útil de un sistema fotovoltaico completo, correctamente instalado y con componentes de buena calidad, se estima entre 15 y 20 años.

Los costos de mantenimiento y operación son aquellos en los que se debe incurrir durante la vida útil de los equipos para conservar en buenas condiciones el sistema fotovoltaico. Normalmente, el mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos no es más que la limpieza adecuada de los equipos, especialmente de los paneles fotovoltaicos, y el reemplazo oportuno del agua de las baterías; por lo tanto, los costos de mantenimiento son bajos y representan un 3-5% del costo total del sistema a lo largo de su vida útil.

Los costos de reemplazo son en los que se debe incurrir cuando las baterías llegan al fin de su vida útil. Generalmente, esto sucede después de 3-5 años de uso, pero depende en buena medida del mantenimiento y de los ciclos de carga y descarga a los que fue sometida la batería. Estos costos representan 20-27% de los costos totales del sistema a lo largo de toda su vida útil.

#### 4.2 Estimación de la inversión

La tabla a continuación muestra las cantidades y precios de los componentes fotovoltaicos instalados en las residencias de la finca El Porvenir

Tabla 4.1 Costos de componentes instalados

Descripción	Unidades	Precio unitario	Total
Panel solar	6	Q. 6,762.50	Q.40,575.00
Baterías	6	Q. 1,170.00	Q. 7,020.00
Regulador	3	Q. 500.00	Q. 1,500.00
Inversor	3	Q. 775.00	Q. 2,325.00
		TOTAL	Q. 51,420.00

#### 4.3 Costos de operación actual

En la actualidad el sistema de motores diesel opera 365 días al año, por un espacio aproximado de nueve horas diarias. El consumo promedio diario de diesel que utiliza el sistema es de 15galones diarios, que con los precios actuales del diesel que oscila alrededor de los Q.22.50 por galón, da un costo mensual de Q. 10,125.00 solo por concepto de combustible. De este costo

mensual aproximadamente el 10% se usa en los generadores para producir electricidad para las residencias. El resto de la energía generada es utilizada en maquinaria de ordeño de ganado y equipo de refrigeración para conservación de la leche.

Si se toma únicamente el consumo mensual sólo de las residencias es de Q. 1,012.50, lo que anualmente representa un gasto de Q. 12,150.00.

Si se toma en cuenta de que los precios de los combustibles en Guatemala dependen del mercado internacional y que en los últimos meses se han demostrado una tendencia al alza en los precios, el gasto por concepto de operación de los equipos cada vez será mayor. Considerando un incremento del 2% anual al precio del diesel, el costo de generar electricidad para las residencias se resume en la tabla 4.2

Tabla 4.2 Costo anual de generación proyectado para las viviendas

Año	2007	2008	2009	2010	2011
Consumo en Q.	12,150.00	12,393.00	12,640.86	12,893.68	13,151.55

#### 4.4 Análisis costo beneficio

La implementación del sistema para las tres residencias representa una inversión de Q. 51,420.00, la cual debe recuperarse en un plazo no mayor a cinco años.

El costo acumulado de combustible por seguir generando electricidad durante los cinco años para las residencias asciende a Q. 63,229.09

##### 4.4.1 Tasa de recuperación de la inversión

$$\frac{\text{ahorro}}{\text{inversión}} = \frac{63,229.09 - 51,420.00}{51,420.00} \times 100\% = 22.97\%$$

La tasa de recuperación del proyecto es de 22.97%

#### 4.4.2 Tiempo de recuperación de la inversión

$$\frac{\textit{inversión}}{\textit{ahorro}} = \frac{51,420.00}{11,809.09} = 4.35$$

Este resultado indica el tiempo que tarda en recuperarse la inversión, para este proyecto es de cuatro años y tres meses.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los estudios realizados se llegó a las siguientes conclusiones:

1. El área de La Gomera, Escuintla posee un alto nivel de radiación solar a lo largo de todo el año, por lo cual es una zona ideal para la implementación de sistemas fotovoltaicos.
2. El tiempo necesario para recuperar la inversión, es de cuatro años y tres meses, lo cual convierte al proyecto en una opción viable, ya que el monto de la inversión se recupera en un término menor a los cinco años planteados.
3. Una adecuada selección de los electrodomésticos y de las cargas a utilizadas, garantizará el buen desempeño del equipo y la duración de las baterías hasta el término de su vida útil.
4. El costo inicial de producción de energía por medios fotovoltaicos es mayor, mientras que el costo mediante los motores de combustión interna es menor. Es por ello que se debe realizar un estudio de factibilidad para cada caso en especial, ya que no todas las necesidades energéticas son iguales.
5. La energía fotovoltaica es una opción viable para comunidades rurales que no poseen acceso a una red de distribución de electricidad.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Blank, L.; Anthony T. 1998. *Ingeniería Económica*. 4ta. ed. Colombia, Editorial McGraw-Hill. 772págs
- Brinkworth, B.J. 1972. *Solar Energy for Man*. EE.UU. John Wiley & Sons. 251 pags
- Carless Jennifer. 1995. *Energía Renovable*. México EDAMEX, S.A. 245 pags
- Kreider, Jan. F; Frank Kreith. 1982. *Solar Heating and Cooling*. 2da. ed. EE.UU, Editorial McGraw-Hill. 479 pags
- Meinel, Aden B.; Marjorie P. Meinel. 1976. *Applied Solar Energy*. EE.UU. Addison-Wesley 651 pags

- <http://www.dianet.com.ar/dianet/users/Solis/Informe2.htm#Energía Solar>.
- <http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ESTACIONES/ESCUINT LA/Insivumeh/Brillo%20Solar%20Insivumeh.htm>
- <http://www.ises.org/>
- <http://www.mem.gob.gt/Portal/Documents/ImgLinks/2007-06/392/INFORME%202006%20-%20version%20normal.pdf>
- <http://www.pvpower.com>
- <http://www.solaraccess.com>. SolarAccess.com
- [www.solstice.crest.org/renewables/re-kiosk/solar/pv/index.shtml](http://www.solstice.crest.org/renewables/re-kiosk/solar/pv/index.shtml)

## 7. ANEXOS

Anexo 1

Horas sol promedio por mes del período 1990 a 2003 para La Gomera, Escuintla

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	252.8	231.2	271.2	232.7	211.1	151.2	209.9	201.3	160.6	218.8	164.9	227.1	211.1
1991	254.6	240.1	285.9	243.1	220.4	165.5	239.1	208.6	181.1	175.1	224.1	215.2	221.1
1992	258.5	226.9	248.5	238	178.1	142.1	171.1	199.5	149.6	183.2	206.1	214.9	201.4
1993	265.9	241.1	234.2	141.1	200	232.2	197	173.6	151.3	185.5	251.8	253	210.6
1994	255.6	238.6	160.8	244.5	204.8	176	248.1	209.1	189	201.7	229.5	216.3	214.5
1995	261.2	238.2	270.5	243.9	257.5	172.9	182.3	143.9	123.9	145.4	232.8	159.1	202.6
1996	252.3	260.4	274.3	210.6	156.5	156.8	195.3	223.2	178.5	168.3	186.6	169.1	202.7
1997	241.8	215.6	241.8	240.1	222	170.6	116.1	285	122.5	183.7	151.8	145.1	194.7
1998	154.3	257.6	226.8	252	187.2	182.7	130.6	152.1	309.6	145.9	119.5	114.9	186.1
1999	164.8	247.9	267.4	267	204.6	111	138.7	170.5	94.6	183.6	222	209.3	190.1
2000	273.3	247.9	247.1	247.8	123.1	133.7	248	195.4	142.1	203.8	213	223.2	208.2
2001	266.6	221.2	254.2	257.3	155	192	195.3	207.7	177.1	195.3	237.1	220.1	214.9
2002	262	236.4	266.2	284	176.6	169	197.6	197.5	123	244.9	234	207.7	216.6
2003	263.9	235.2	235.6	261	170.5	138	213.9	223.2	165	164.3	225	229.4	210.4

## Anexo 2

### Tabla para selección de paneles solares

THE NEW VALUE FRONTIER



#### KC MODULES SPECIFICATIONS

	KC200GT	KC175GT	KC130GT	KC130TM	KC85T	KC65T	KC50T	KC40T
Maximum Power	200W	175W	130W	130W	87W	65W	54W	43W
Tolerance	+10/-5	+10/-5	+10/-5	+10/-5	+10/-5	+10/-5	+15/-5	+15/-5
Maximum System Voltage	600V	600V	600V	600V	600V	600V	600V	600V
Maximum Power Voltage	26.3V	23.6V	17.6V	17.6V	17.4V	17.4V	17.4V	17.4V
Maximum Power Current	7.61A	7.42A	7.39A	7.39A	5.02A	3.75A	3.11A	2.48A
Open Circuit Voltage	32.9	29.2	21.9	21.9	21.7	21.7	21.7	21.7
Short Circuit Current	8.21	8.09	8.02	8.02	5.34	3.99	3.31	2.65
Length	56.2"	50.8"	56.0"	56.0"	39.6"	29.6"	25.2"	20.7"
Width	39"	39"	25.7"	25.7"	25.7"	25.7"	25.7"	25.7"
Depth	1.4"	1.4"	1.4"	2.2"	2.2"	2.1"	2.1"	2.1"
Weight	40.7 lbs	35.3 lbs	33.0 lbs	33.0 lbs	24.0 lbs	18.0 lbs	16.0 lbs	13.0 lbs
Warranty	25 Years	25 Years	25 Years	25 Years	25 Years	25 Years	25 Years	25 Years
Frame Color	Bronze Anodized	Bronze Anodized	Bronze Anodized	Clear Anodized	Clear Anodized	Clear Anodized	Clear Anodized	Clear Anodized
Termination Method	Plug-in Connectors	Plug-in Connectors	Plug-in Connectors	Conduit Ready Junction Box	Conduit Ready Junction Box	Conduit Ready Junction Box	Conduit Ready Junction Box	Conduit Ready Junction Box

Kyocera reserves the right to modify these specifications without notice.

All specification at 25°C, cell temperature, 1.5 AM and 1000W/m<sup>2</sup>.  
 KC "T" and "TM" modules have a conduit ready junction box. "GT" modules have multi-contact type connectors.

**KYOCERA SOLAR, INC.**  
 800-223-9580 toll-free  
 800-523-2329 fax  
[www.kyocerasolar.com](http://www.kyocerasolar.com)

© 2006 Kyocera Solar, Inc. All rights reserved.

## Anexo 3

### Tabla para selección de baterías fotovoltaicas

Type	LEUs	Reserve Capacity		20 Hour Rate AH	5 Hour Rate AH <sup>1</sup>	Length	Overall Dimensions inches (mm)		Approx. Weight lbs. (kg.)	Color Cover/Case
		Minutes @ 56 Amps	Minutes @ 75 Amps				Width	Height		
<b>DEEP CYCLE 6 VOLT BATTERIES</b>										
T-605	383	—	105	190	155	10 3/8 (264)	7 1/8 (181)	11 3/16 (284)	58 (26)	MAR/MAR
T-105	438	—	115	225	171	10 3/8 (264)	7 1/8 (181)	11 3/16 (284)	62 (28)	MAR/MAR
T-125	492	—	132	235	192	10 3/8 (264)	7 1/8 (181)	11 3/16 (284)	66 (30)	MAR/MAR
T-145	673	—	145	244	209	10 3/8 (264)	7 1/8 (181)	11 1/2 (292)	72 (33)	MAR/MAR
<b>DEEP CYCLE 8 VOLT BATTERIES</b>										
T-875	438	117	75	150	143	10 3/8 (264)	7 1/8 (181)	11 3/16 (284)	63 (29)	MAR/MAR
T-890	511	132	90	165	146	10 3/8 (264)	7 1/8 (181)	11 3/16 (284)	69 (31)	MAR/MAR

#### PRODUCT SPECIFICATIONS

#### PRODUCT VALUE COMPARISON

Compare the total lifetime energy value and you'll choose Trojan. The brand you can trust for performance and value.



<sup>1</sup>. 5 hour rate is based on IEC (International Electrotechnical Commission) temperature standard of 30°C(86°F). (Front battery label for photography only.)



In Georgia: 770-981-8674, 800-246-2550, Fax: 770-981-7717. www.trojanbattery.com. **Trojan-Your Lifetime Energy Source™**

12380 Clark Street, Santa Fe Springs, CA 90670. Phone: 562-946-8381. 800-423-6569, Fax: 562-906-4033.

GLFC-5