

Proyecto fotovoltaico El Higueral: una alternativa eficiente para la electrificación rural

1. Introducción

En El Salvador la utilización de la tecnología fotovoltaica es cada vez más frecuente. Si bien esta es una muy buena noticia, es necesario también mencionar que en el país, lamentablemente, ni se ha alcanzado el nivel de utilización del recurso solar observado en el resto de países centroamericanos, ni existe una política estratégica nacional para promover y facilitar el uso de las energías renovables.

La mayoría de nuestras aplicaciones en electrificación rural consisten aun en sistemas fotovoltaicos individuales (SFI), cuya capacidad es menor a los 100 W-p¹. La instalación de este tipo de sistemas fotovoltaicos en algunas viviendas desabastecidas del suministro eléctrico convencional es producto, por lo general, de iniciativas dispersas de quienes consideran la energía solar fotovoltaica como una alternativa, limitada pero eficaz, para resolver el problema energético del país o por otros que consideran a esta tecnología como un mercado potencial, que es necesario estimular. Independientemente de cuál sea la motivación, el uso exclusivo de sistemas fotovoltaicos individuales de pequeña capacidad, como tantas otras respuestas tecnológicas, no es la solución universal para resolver de manera eficiente las necesidades

de electrificación rural. Desde una perspectiva tecnológica adecuada, esta opción no debe aplicarse de una forma indiscriminada —aunque, de hecho, ha sido así—, sino sólo en aquellos casos en los cuales sea ventajoso hacerlo, es decir, cuando las viviendas rurales se encuentran dispersas y cuando el consumo de energía de sus habitantes es muy bajo en cantidad y calidad.

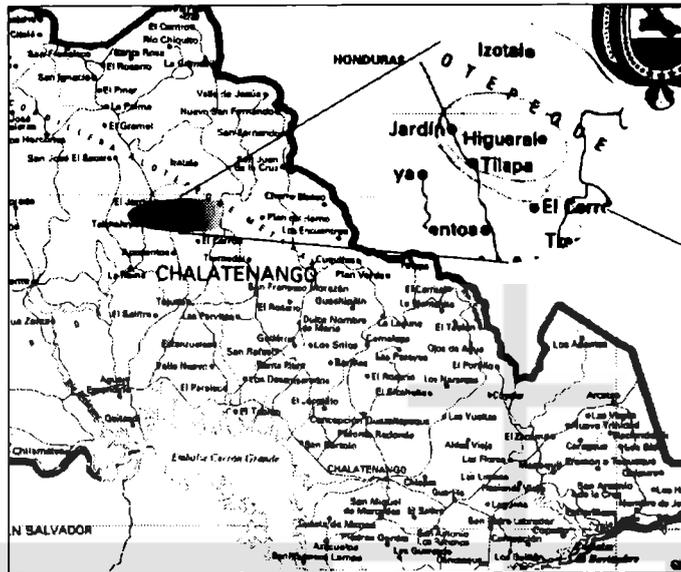
Este comentario describe los antecedentes, los aspectos sociales y los aspectos tecnológicos de una aplicación frecuente en países más desarrollados y con más experiencia en esta clase de energía que el nuestro. Pero con una novedad: la aplicación se hace a partir de un sistema fotovoltaico centralizado. No se pretende explicar o describir exhaustivamente esta tecnología, sino motivar a conocer más sobre energía solar fotovoltaica, especialmente sobre las diversas soluciones que ofrece para resolver los problemas energéticos de muchas comunidades rurales de El Salvador de una manera más eficiente e inteligente.

2. Antecedentes

El Higueral es el nombre de la aldea, ubicada en la zona central del departamento de Chalatenango (ver Figura 1).

1. El Vatio-pico (W-p) es una medida comparativa de la capacidad de los paneles o módulos fotovoltaicos para generar energía.

Figura 1
Ubicación de El Higueral en el departamento de Chalatenango



La comunidad consta de 36 familias que habitan pequeñas casas, distribuidas en un área montañosa de un kilómetro cuadrado aproximadamente. Las 131 personas que viven en El Higueral pertenecen a familias pobres, con una economía de sobrevivencia, cuyos ingresos provienen de cultivos en pequeñas áreas de ladera, donde producen granos básicos (maíz, frijoles y maicillo). Algunas de ellas cuentan, además, con un poco de ganado mayor y menor de mala calidad (cerdos, aves y vacas). El ritmo de vida de los habitantes de El Higueral es similar al de muchas comunidades rurales de Chalatenango: Los hombres se dedican, con la ayuda de sus hijos, al trabajo agrícola y a cuidar los animales; las mujeres permanecen en la casa,

cuidando a los hijos pequeños, preparando los alimentos y guardando las pertenencias de la familia. Cuando los niños y las niñas crecen, el ciclo de sus padres se repite: los primeros se convierten en padres muy jóvenes, cuya única opción es el trabajo agrícola de subsistencia; mientras que ellas se convierten en madres sin opciones para contribuir al desarrollo económico de la nueva familia. Las Figuras 2a y 2b representan la distribución demográfica de la comunidad por género y edad, respectivamente. Nótese que la mayoría de los habitantes está formada por menores de edad.

La comunidad tiene una directiva comunal, elegida anualmente. Entre las actividades prin-

Figura 2a
Número de habitantes, según género

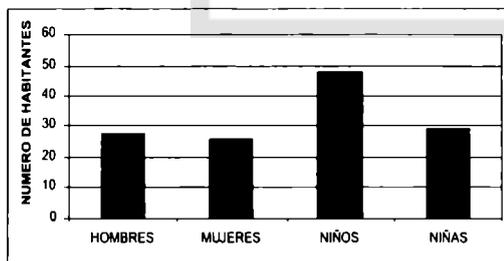
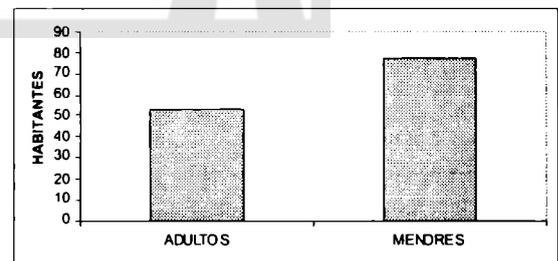


Figura 2b
Número de habitantes adultos y habitantes menores de edad



cipales de organización están la producción agrícola, la realización de pequeños proyectos para mujeres, el cuidado de la casa comunal, la reconstrucción de sus viviendas, el mantenimiento del sistema de agua potable, la construcción y el mantenimiento de la escuela, el funcionamiento de una pequeña clínica, el uso de la bodega comunal y la reparación de los caminos vecinales.

Los diez años desde que sus habitantes regresaron de los refugios de Honduras, a donde los arrojó la guerra, han sido de gran esfuerzo para sobrevivir y reconstruir. A principios de 2000, se concluyó la construcción de la calle de acceso a la comunidad. Durante la estación seca, el tráfico de vehículos de doble tracción es posible; en la estación lluviosa, es necesario realizar labores permanentes de mantenimiento para evitar que la lluvia la deteriore a tal grado de que sea imposible el acceso de cualquier tipo de vehículo a la comunidad.

Los habitantes de El Higueral conocen de la energía solar gracias a un pequeño sistema fotovoltaico que fue donado, transportado e instalado por amigos estadounidenses de la comunidad, después de finalizada la guerra civil. Este sistema fotovoltaico, con una capacidad de 90 W-p, fue instalado en la casa comunal y funcionó, según los usuarios, sin ningún problema durante dos años consecutivos, hasta que un rayo lo destruyó. Desde entonces, los habitantes de la comunidad siempre estuvieron muy interesados en la reparación de su sistema, pues la experiencia previa había sido positiva y las condiciones de aislamiento y altura de El Higueral no permitían prever otra forma de suministrar energía eléctrica a la casa comunal. Hicieron gestiones directas ante organismos de diverso tipo, sin ningún resultado. La directiva comunal planteó, entonces, a la alcaldía municipal de San Francisco Morazán y a la organización no gubernamental Cooperación y Desarrollo Comunitario de El Salvador (CORDES) la necesidad de contar otra vez con energía eléctrica para su comunidad.

A finales de 1998, esta última organización buscó ayuda técnica en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" (UCA) para reparar el sistema fotovoltaico dañado. El equipo técnico de ésta visitó la comunidad para conocer los daños sufridos por el sistema. Pero para hacer un diagnóstico más completo sobre su estado, fue necesario trasladar los módulos fotovoltaicos a los laboratorios de la universidad. Lamentablemente, los paneles fotovoltaicos habían sufrido daños irrever-

sibles, los cuales ocasionaron una disminución considerable en su capacidad para generar energía eléctrica. Ante esta situación, la UCA formuló, a petición de Cooperación y Desarrollo Comunitario de El Salvador, los requerimientos técnicos para la electrificación de la comunidad.

El análisis de las alternativas para electrificar a El Higueral (red eléctrica, planta diesel y sistemas fotovoltaicos) dio que la opción fotovoltaica era la más adecuada y viable desde el punto de vista económico. En enero de 1999, la UCA, con el respaldo de la Fundación para el Río Lempa (FUNDALEMPA), hizo un estudio de las "Posibilidades de utilización de fuentes renovables de energía en Chalatenango". En este contexto se desarrolló el proyecto de electrificación fotovoltaica para El Higueral. La idea de electrificar por medio de sistemas fotovoltaicos a la comunidad fue financiada por *Bruder und Schwester im Not*, una organización austriaca, la cual proporcionó una cantidad moderada de dinero para la ejecución de todo el proyecto (23 460 dólares).

Las limitaciones presupuestarias del proyecto exigieron evaluar la posibilidad de utilizar, en lugar del sistema fotovoltaico individual tradicional, uno centralizado. En efecto, y prescindiendo de la razón antes expuesta, la UCA ya había detectado, en las primeras visitas a la comunidad, ciertos indicios y condiciones que permitían utilizar esta alternativa, los cuales se explican a continuación:

(a) No había posibilidades, a corto o mediano plazo, de que la red eléctrica comercial se extendiera hasta El Higueral, la cual se detiene en Teosinte, una población ubicada a 4.9 kilómetros. La instalación del servicio eléctrico en Teosinte no fue producto de una inversión privada de la empresa local de electricidad, sino de donaciones realizadas por el gobierno de Austria. Debido a que tanto los ingresos económicos como los consumos energéticos de los habitantes de El Higueral son extremadamente bajos, aproximadamente 30 colones diarios por familia y 150 W-h/día respectivamente, la compañía local de energía no tenía incentivos económicos para invertir en la extensión de la red eléctrica hasta la cordillera, donde se encuentra El Higueral.

(b) Las necesidades energéticas de los habitantes de la comunidad a corto y mediano plazo eran relativamente bajas. La energía eléctrica se necesitaba principalmente para sistemas básicos de iluminación y el uso de aparatos de telecomunicación. Cada casa

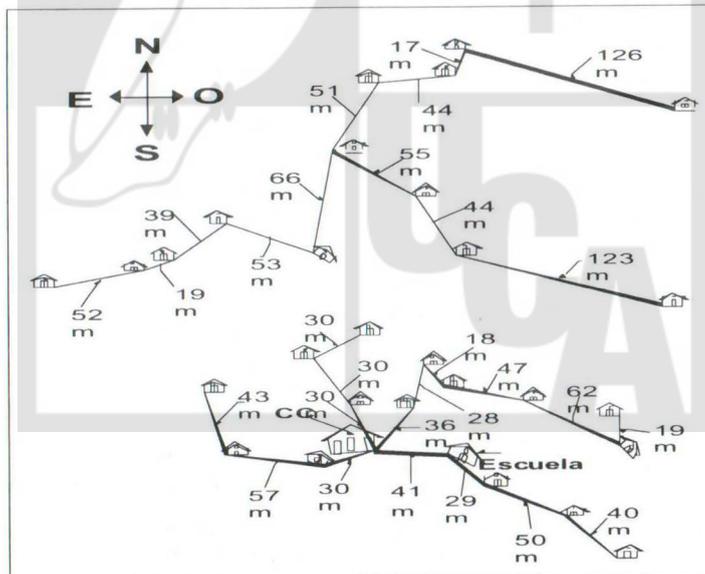
necesitaba de dos puntos de luz, cada uno de 800 lúmenes aproximadamente, y de una enchufe de corriente a 120 VAC para el uso de radiograbadoras o televisores pequeños. En la casa comunal, en cambio, se necesitaba ocho puntos de luz y una enchufe de corriente a 120 VAC con capacidad para conectar electrodomésticos de mediana capacidad (hasta 1440 VA). La clínica, por ser pequeña y de uso diario poco frecuente, necesitaba solamente un punto de luz y una enchufe a 120 VAC. Un aspecto muy importante es que, dada la situación socio-económica de la comunidad, es previsible que sólo sean necesarios incrementos pequeños en el consumo, a mediano y largo plazo. Al principio, era de esperar un incremento sensible en el consumo, debido a que la comunidad deseaba adquirir aparatos de entretenimiento de bajo costo (radios y televisores B/N); sin embargo, una vez que los que pudieran pagar hubiesen adquirido sus equipos, la demanda de energía eléctrica se estabilizaría y no se producirían más incrementos considerables.

(c) La mayoría de las casas se encuentran próximas. La mayor distancia entre una vivienda y otra es de 126 metros, aunque la topografía es bastante irregular, pero con poca vegetación. Esta distri-

bución de casas, bastante común en algunas comunidades rurales de Chalatenango, permitía reducir significativamente los costos de las líneas subterráneas de distribución de energía eléctrica, en caso de utilizar un sistema fotovoltaico central. Otra ventaja era que las posibles trayectorias de las líneas subterráneas no atravesarían ningún campo de cultivo o trabajo, reduciéndose así el riesgo para la población. Sin embargo, era necesario adoptar algunas medidas de seguridad para proteger las líneas de una manera adecuada, en particular las que cruzaran pequeños arroyos en invierno. La Figura 3 muestra la distribución espacial de las casas de la comunidad y la distancia que las separa.

(d) La comunidad tenía una experiencia previa positiva con el uso de sistemas fotovoltaicos. En efecto, sus miembros estaban convencidos de que el sistema fotovoltaico de 90 W-p, instalado anteriormente, generaba sin problemas energía eléctrica para el pequeño televisor y para las cuatro lámparas fluorescentes a 12 VDC, instaladas en la casa comunal. Según ellos, el fallo del sistema se debió "al impacto directo de un rayo" y a la imprudencia de utilizar el sistema fotovoltaico durante una tormenta eléctrica".

Figura 3
Distribución de casas en El Higueral

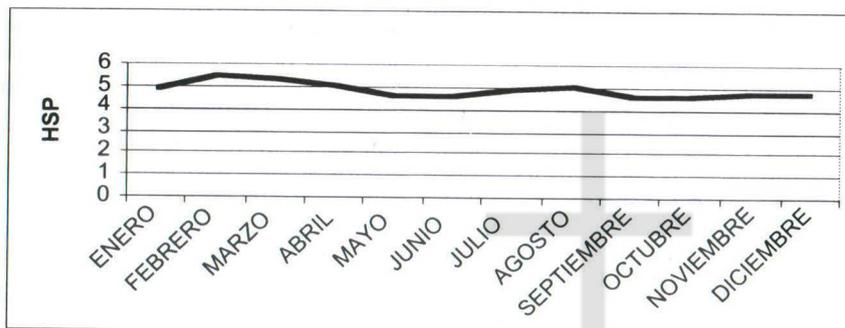


2. En la zona existe una alta incidencia de caída de rayos.

(e) Las condiciones atmosféricas en la región son favorables para los sistemas fotovoltaicos. El Salvador dispone, aproximadamente, de un promedio anual de 5 HSP³. Los meses más desfavorables

son junio y septiembre, en los cuales, por lo general, se dan períodos nublados de una duración máxima de cuatro a cinco días. La Figura 4 muestra datos estimados de HSP en El Salvador.

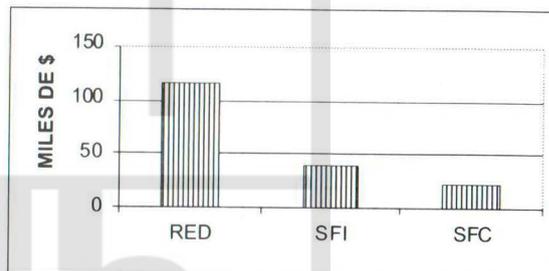
Figura 4
Datos estimados de HSP en El Salvador



El análisis económico de las alternativas de un sistema fotovoltaico individual contra uno centralizado fue relativamente sencillo. Este se hizo, inicialmente, considerando para cada alternativa el costo del W-h producido y el costo de la inversión inicial necesaria para proveer 148 W-h/día a cada una de las casas y 516 W-h/día a la casa comunal (incluyendo la clínica de salud). Finalmente, se consideró que el monto de la inversión inicial era la mejor forma de abordar la comparación económica entre las dos alternativas, pues éste determinaría cuál era la alternativa económicamente viable, según el presupuesto disponible. Además, no existía la certeza de la cantidad de W-h/día producidos o demandados, pero sí de la cantidad de W-p necesarios para garantizar la generación de la energía necesaria para la comunidad.

La Figura 5 muestra los costos estimados de las alternativas convencional e innovadora. En ambos casos, la base de la comparación es el costo de W-p para cada alternativa. Este costo W-p incluye, además del costo de las celdas fotovoltaicas, los costos del acumulador, de los sistemas de control e inversión, etc.

Figura 5
Costos iniciales estimados para red eléctrica, SFI y SFC



3. Características técnicas

En este apartado se describen las características técnicas más relevantes de los GFC (generadores fotovoltaicos centralizados) de El Higueral. Inicialmente se explican algunos conceptos básicos; luego se describen las características más relevantes de los equipos empleados; y, finalmente, se mencionan algunas conclusiones preliminares obtenidas.

3. HSP: Horas Sol Pico. Es el número de horas en las cuales se recibe una radiación solar de 1000 W/m².

3.1. Demanda

La demanda de energía eléctrica en la comunidad y la energía solar disponible son variables fundamentales para calcular cualquier sistema fotovoltaico. En este sentido, El Salvador posee condiciones privilegiadas de radiación solar durante casi todo el año (ver la Figura 4). Aquí se presentan los valores estimados de las demandas nominal y actual así como de la capacidad de generación del sistema fotovoltaico centralizado, en las condiciones actuales y previstas.

La demanda prevista es la cantidad estimada de energía eléctrica que se considera suficiente para satisfacer adecuadamente las necesidades energéticas básicas de la comunidad. Este valor se determina a partir de un balance realista entre la necesidad de energía de las personas y los recursos económicos disponibles para satisfacerla. Los supuestos fundamentales para establecer la demanda prevista de El Higueral fueron: (a) la comunidad necesita una cantidad relativamente baja de energía eléctrica y no se prevé incrementos considerables de la misma; (b) hará uso exclusivo de sistemas de iluminación interna eficientes; (c) utilizará equipos de audio y vídeo de pequeño consumo energético y (d) solamente veintiocho casas poseen posibilidades reales de electrificación fotovoltaica centralizada⁴. En el Cuadro 1 se muestran los valores máximos previstos para la energía y la potencia de toda la comunidad.

Cuadro 1
Valores previstos para la electrificación

Tipo de carga	E_{MAX} (W-h/día)	$P_{MAX,CASA}$ (W)	$E_{MAX-TOT}$ (W-h/día)	$P_{MAX-TOT}$ (W)
VR	148	64	4144	1792
CC+CS	516	262	516	262
Total			4660	2054

VR : Vivienda rural
CC : Casa comunal
CS : Clínica de salud

La estimación de las capacidades de los equipos fotovoltaicos necesarios para satisfacer las necesidades previstas para El Higueral se hizo a partir de los valores mostrados en el Cuadro 1. Un aspecto fundamental de la fase de diseño fue la elección entre uno o más sistemas centralizados. Finalmente, se optó por dos sistemas centralizados, en lugar de uno, más por razones sociales que por técnicas. En El Higueral, el sitio ideal para instalar el sistema fotovoltaico centralizado era la cancha de fútbol, ubicada en el centro de la comunidad; sin embargo, esta alternativa fue rechazada por los usuarios del campo, quienes, por cierto, eran en su mayoría jóvenes aptos para colaborar en el proyecto. Para evitar alterar las costumbres sociales (y deportivas) de la comunidad y para que el sistema fotovoltaico centralizado no generara desde el inicio una fuente de discordia entre los miembros de la comunidad, se abandonó rápidamente la idea de instalarlo en ese lugar. Se decidió, entonces, instalar dos sistemas centralizados, aunque esto redujera un poco las ventajas económicas. La opción de dos sistemas también resultó atractiva, pues permitiría expandir el sistema con mayor facilidad en el futuro y facilitaba la reducción de las pérdidas de energía de las líneas eléctricas. Los lugares apropiados y disponibles para instalar los dos sistemas determinaron, en buena medida, las casas que se conectarían a cada uno de ellos. Estos lugares fueron los predios cercanos a la casa comunal y a la casa 16 (ver la Figura 12). Los Cuadros 2 y 3 muestran las demandas previstas para los GFC-I y GFC-II.

Cuadro 2
Valores máximos previstos GFC-I

Tipo de carga	No	E_{MAX} (W-h/día)	P_{MAX} (W)	Tipo de onda
VR	15	2220	960	SENOIDAL PURA 120 V @ 60 Hz
CC + CS	01	516	262	
Total		2736	1222	

4. El Higueral tiene 36 casas, pero ocho de ellas están demasiado lejanas y dispersas como para ser electrificadas con un sistema fotovoltaico centralizado.

Cuadro 3
Valores máximos previstos GFC-II

Tipo de carga	No	E_{MAX} (W-h/día)	P_{MAX} (W)	Tipo de onda
VR CC + CS	13	1924	832	SENOIDAL PURA 120 V @ 60 Hz.
<i>Total</i>		<i>1924</i>	<i>832</i>	

Los Cuadros 4 y 5 muestran que el Sistema fotovoltaico central I debe suministrar más energía que el Sistema fotovoltaico central II. Esto se debía a que aquél no solo tendría que suministrar energía a más viviendas rurales que éste; sino, también, a la casa comunal y a la clínica.

La demanda actual de energía eléctrica es aquel valor que representa el consumo inicial de la comunidad. Lógicamente, la demanda actual de la comunidad es menor que la demanda máxima prevista. Hay dos razones que explican este fenómeno. La primera es que la mayoría de las familias de El Higueral no dispone aún de equipos de audio ni de vídeo que operen con 120 V de corriente alterna. Aunque la mayoría⁵ de los habitantes desea comprar de inmediato equipos de radio y televisión que funcionen a 120 VAC, sólo unos cuantos poseen la capacidad económica para hacerlo, en el corto plazo. La segunda es que todas las lámparas eficientes instaladas son de 11 W (y alto factor de potencia). Estas consumen menos energía que las lámparas eficientes de 18 W, consideradas en la fase de diseño. Hay tres casas que, por diferentes razones, no hacen uso todavía de la energía eléctrica producida por los sistemas fotovoltaicos centralizados. En los Cuadros 4 y 5 se muestran los datos actuales de demanda⁶ para GFC-I y GFC-II:

Cuadro 4
Valores actuales GFC-I

Tipo de carga	No	E_{MAX} (W-h/día)	P_{MAX} (W)	Tipo de onda
VR CC + CS	13 01	1592 297	398 99	SENOIDAL PURA 120 V @ 60 Hz
<i>Total</i>		<i>1889</i>	<i>497</i>	

- Existen algunas familias que consideran la televisión como algo perjudicial para los jóvenes, pues "les hace holgazanes y aprenden cosas malas".
- Medidos el 9 de septiembre de 2000 (fecha de inauguración del proyecto).

Cuadro 5
Valores actuales GFC-II

Tipo de carga	No	E_{MAX} (W-h/día)	P_{MAX} (W)	Tipo de onda
VR CC + CS	12	1208	302	SENOIDAL PURA 120 V @ 60 Hz
<i>Total</i>		<i>1208</i>	<i>302</i>	

Las Figuras 6 y 7 muestran gráficamente las demandas, prevista y actual, para cada uno de los sistemas fotovoltaicos centralizados instalados.

Figura 6
Demanda prevista y demanda actual
(09-09-2000) para el SFC-I

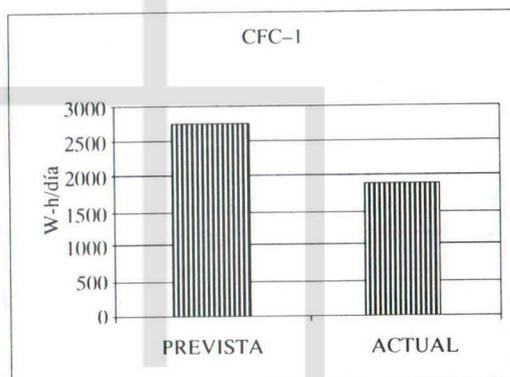
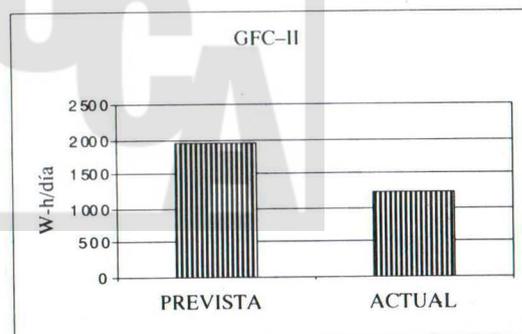


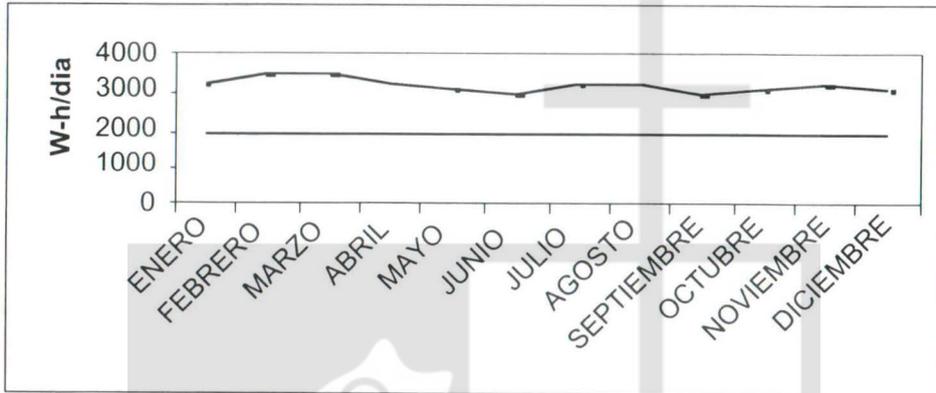
Figura 7
Demanda prevista y demanda actual
(09-09-2000) para el SFC-II



La producción estimada de energía eléctrica de cada una de los sistemas fotovoltaicos centralizado de El Higueral se calcula a través de modelos matemáticos que consideren las HSP en la región, la eficiencia total del sistema y las capacidades de los equipos instalados. La Figura 8 muestra la producción estimada de energía (línea curva) junto con la demanda de energía actual (línea recta) para el Sis-

tema fotovoltaico I. Nótese el amplio margen de seguridad que existe entre ambas gráficas, inclusive en los meses de menor radiación solar. Según este modelo, el sistema I estaría en capacidad de generar durante todo el año más energía de la que realmente se necesita con las condiciones actuales de carga (Figura 8).

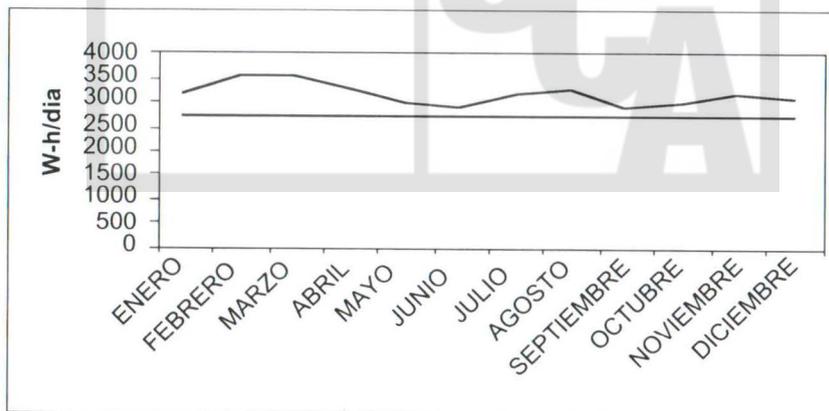
Figura 8
Capacidad de generación estimada *versus* demanda actual en el SFC-I



La Figura 9 muestra la producción estimada de energía junto con la demanda prevista de energía para el Sistema fotovoltaico centralizado I. Nótese que este sistema siempre tendrá capacidad para ge-

nerar más energía que la demandada por la comunidad. Este margen de seguridad permite, incluso, pensar en un crecimiento pequeño de la demanda prevista, sin necesidad de modificar los equipos físicos existentes.

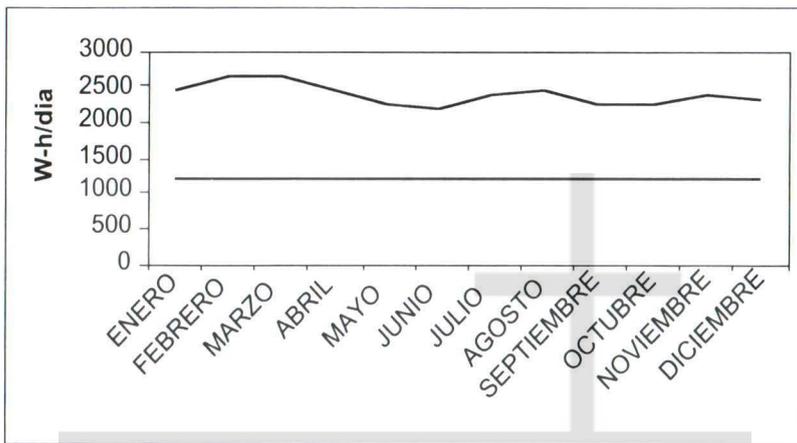
Figura 9
Capacidad de generación estimada *versus* demanda prevista en el SFC-I



La Figura 10 muestra la producción estimada de energía junto con la demanda actual en el Siste-

ma fotovoltaico centralizado II. Su capacidad para cubrir la demanda actual es evidente.

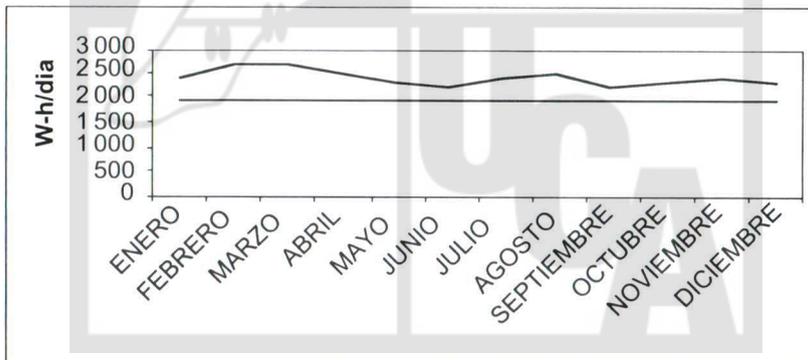
Figura 10
Capacidad de generación estimada versus demanda actual en el SFC-II



La Figura 11 muestra la producción estimada de energía junto con la demanda prevista para el Sistema fotovoltaico centralizado II. Al igual que en todos los casos anteriores, también tiene capa-

acidad para generar más energía que la necesaria, aún en los períodos menos soleados del año. Este sistema también tiene capacidad para satisfacer un crecimiento pequeño de la demanda prevista.

Figura 11
Capacidad de generación estimada versus demanda prevista en el SFC-II



3.2. Subsistemas de distribución

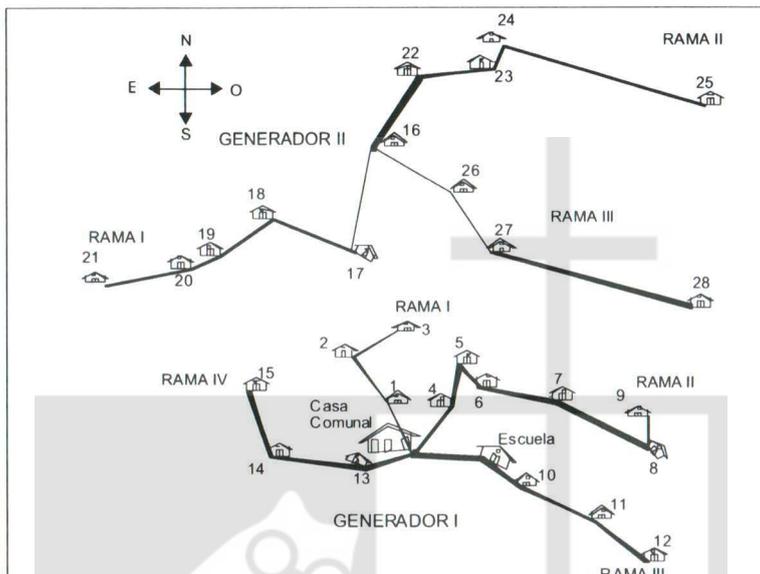
En El Higueral existen dos subsistemas de distribución, uno por cada sistema fotovoltaico centralizado. La distribución de la energía eléctrica desde los generadores fotovoltaicos hasta cada una

de las casas se realiza a través de líneas subterráneas. Las trayectorias fueron determinadas cuidadosamente según las pérdidas de voltaje máximas permisibles (3 %) y según la topografía del lugar. La Figura 12 muestra la distribución radial de am-

bos subsistemas de transmisión de energía eléctrica. Nótese que el Sistema fotovoltaico centralizado I posee 4 líneas; mientras que el II, únicamente

3. Obsérvese también la ubicación estratégica de cada uno de los generadores fotovoltaicos con respecto a la ubicación de las casas.

Figura 12
Distribución espacial de las líneas de distribución en El Higueral (En metros)



La Figura 13 muestra la capacidad máxima de conducción de corriente (color gris) y la corriente correspondiente a la demanda estimada máxima (color negro) en cada línea del sistema I.

La Figura 14 muestra la capacidad máxima de conducción de corriente (color gris) y la corriente correspondiente a la demanda estimada máxima (color negro) de cada línea del sistema II.

Figura 13
Capacidad máxima de corriente para cada línea del SFC-I (color gris) versus corriente para la demanda máxima estimada (color negro)

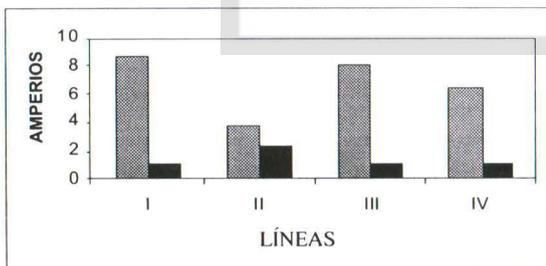
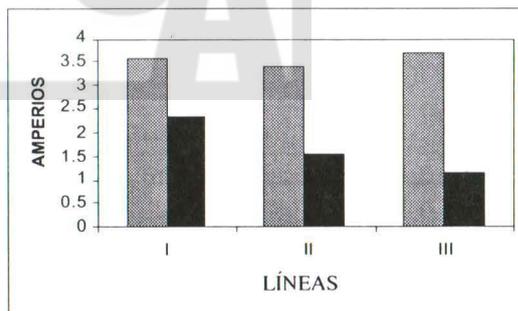


Figura 14
Capacidad máxima de corriente para cada línea del SFC-II (color gris) versus corriente para la demanda máxima estimada (color negro)



Las Figuras 13 y 14 muestran claramente que todas las líneas pueden conducir más corriente de la que normalmente circulará por ellas, en condiciones de demanda máxima estimada.

3.3. Subsistemas de generación

El Cuadro 6 contiene un resumen de las características más relevantes de cada uno de los generadores fotovoltaicos utilizados en los dos sistemas centralizados.

Cuadro 6
Características más importantes de los generadores fotovoltaicos I y II

	P _{NOMINAL} W-p	V _{NOMINAL} v	I _{NOMINAL} A	Número módulos A-120
SFC-I	960	24	28.4	8
SFC-II	720	24	21.3	6
<i>Total</i>	<i>1680</i>	<i>24</i>	<i>49.7</i>	<i>14</i>

La Figura 15 muestra una imagen del generador fotovoltaico instalado en el sistema centralizado I.

Figura 15
Generador fotovoltaico de 960 W-p instalado en el SFC-I



En los Cuadros 7 y 8 se indican las características eléctricas y físicas del módulo A-120. Nótese que es un módulo de gran potencia⁷, cuyo uso reduce significativamente los problemas de alambrado en la conexión serie-paralelo de los paneles fotovoltaicos.

Cuadro 7
Características eléctricas del módulo A-120

Características eléctricas	A-120
Potencia	120 W
Número de celdas en serie	36
Corriente MPP	7.1 A
Voltaje MPP	16.9 V
Corriente de cortocircuito	7.7 A
Voltaje de circuito abierto	21 V

Cuadro 8
Características físicas del módulo A-120

Características físicas	A-120
Longitud	1477 mm
Anchura	660 mm
Espesor	35 mm
Peso	11.9 Kg

3.4. Subsistemas de acumulación

Una particularidad más de los sistemas fotovoltaicos centralizados de El Higueral es el tipo de elementos acumuladores. En lugar de utilizar las tradicionales baterías de 12 V —tipo monobloc, conectadas en alguna configuración serie-paralelo— en El Higueral se instalaron, para cada uno de los sistemas centralizados, bancos de acumulación especiales para aplicaciones fotovoltaicas compuestos por 12 vasos translúcidos de 2 V y 963 A-h a C-100 (Figura 16). Las ventajas más importantes de esta configuración son: mayor vida útil de las celdas, almacenamiento más eficiente, reducción de problemas de desequilibrio de carga/descarga, menos problemas de alambrado,

7. El módulo más grande suministrado por la empresa ATERSA es el A-130.

menor espacio y se evitan los usos no permitidos de las baterías

Figura 16
Sub-sistema de acumulación del SFC-I
Capacidad 963 A-h @ C-100 y 25 DVC



3.5. Subsistemas de regulación

Los sistemas de control y regulación de los dos sistemas centralizados instalados en El Higueral utilizan microcontroladores para la gestión de todas las actividades de carga y descarga, en el banco de baterías. La programación contenida en cada regulador se adapta a las distintas situaciones automáticamente, permitiendo la modificación manual de los parámetros, si es necesario. Los reguladores también tienen incorporada instrumentación digital, que permite conocer los valores de tensión en la batería, corriente de carga y corriente de descarga. Contactos auxiliares permiten extender la capacidad de protección y alarma de cada regulador, permitiendo la realización de actividades de control idóneas para la aplicación en particular.

A continuación se mencionan las funciones más importantes realizadas por este tipo de regula-

dores: regulación de carga de flotación y carga profunda; protección electrónica contra cortocircuitos con rearme automático en línea de consumo; desconexión de la salida de consumo por baja tensión; desconexión de la entrada de paneles por alta tensión; alarma acústica y visual por baja y alta tensión de batería, salida de señal de alarma con relé libre de potencial; indicadores luminosos de carga, flotación, desconexión de consumo, alarma de alta tensión de la batería y alarma de baja tensión de batería; corrección automática de las tensiones de activación y rearme en función de la temperatura, la capacidad de la batería y la corriente de carga; cálculo de las tensiones de flotación, en función del estado de carga registrado durante los últimos días; relés de estado sólido para carga y consumo, y relés libres de potencial para la transmisión de alarmas; selección de la capacidad y tipo de batería instalada.

3.6. Subsistemas de conversión

Los subsistemas de conversión de los sistemas fotovoltaicos centralizados I y II constan, cada uno, de un inversor DC/AC (de 24 VDC a 120 VAC) de 1500 VA a 20° C.

La señal producida en una onda senoidal pura es una característica que permite la utilización de cualquier aparato eléctrico sin los inconvenientes de distorsión, daño a las fuentes de potencia y alto consumo de energía, que caracteriza a la utilización de inversores con señales rectangulares o senoidal aproximadas.

La eficiencia promedio de cada inversor es excelente, inclusive para cargas bajas ya se dispone de una eficiencia superior a 0.90, la cual disminuye ligeramente a medida que la carga se incrementa.

Estos inversores fueron diseñados especialmente para proporcionar energía AC en sistemas fotovoltaicos autónomos. Cada inversor puede proporcionar potencias pico de hasta un 300 por ciento de su capacidad nominal; cuentan con protecciones contra sobretensiones y sistemas de control que les permiten un funcionamiento completamente automático. Otras características sobresalientes de estos inversores son su fácil mantenimiento y su bajo nivel sonoro.

3.7. Subsistemas de control y protección

Los sub-sistemas de protección y control de los equipos fotovoltaicos fueron ampliados con la

incorporación de otros elementos de mando y protección. Los objetivos fueron hacer extremadamente simple para los habitantes de El Higueral la operación de los sistemas fotovoltaicos centralizados; reforzar la protección de los equipos contra descargas eléctricas (lejanas y cercanas); y proteger los sistemas contra usos no permitidos de energía⁸. Algunas de los controles y protecciones extras incorporados a cada sistema centralizado son encendido y apagado general del sistema a través de una llave, el encendido y apagado de cada línea del sistema se controla con interruptores de palanca únicamente accesibles al operador autorizado, fu-

sibles de protección independientes para cada línea, protección general magnetotérmica ajustable, conexión y desconexión de la energía por medio de relés de estado sólido, activados manual o automáticamente, pararrayos tipo Franklin y red de tierra

La Figura 17a muestra el regulador LEO2, el inversor TAURO BC-1524 y el panel de control, instalados en cada uno de los sistemas centralizados. Nótese cómo los dispositivos se encuentran fijados a una estructura metálica resistente y debidamente polarizada.

Figura 17a
Sistema de protección, regulación, inversión DC/AC y control del SFC-I



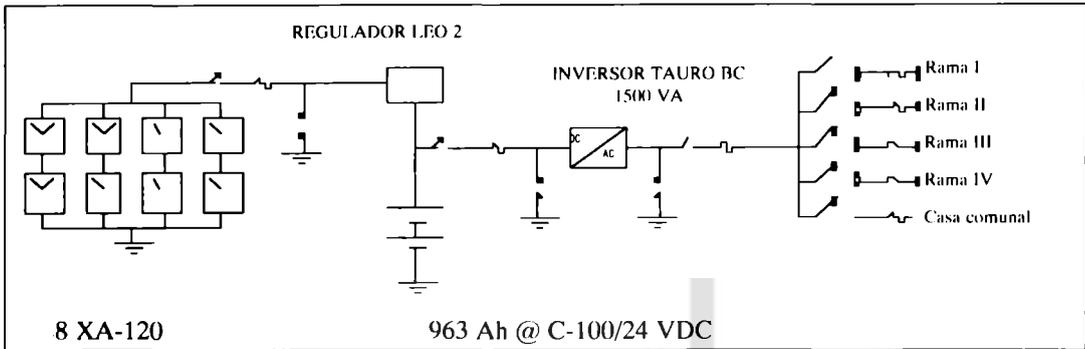
3.8. Diagramas generales

La Figura 17b muestra el diagrama general básico de los sistemas fotovoltaicos centralizados. La única diferencia importante entre ambos es que el sistema I posee 8 paneles A-120; mientras que el

sistema II, sólo 6. Pensando en ampliaciones futuras, en la zona del sistema II, la estructura de soporte que contiene los módulos fotovoltaicos tiene capacidad para colocar dos paneles A-120 adicionales. Por razones similares, el sistema II posee una línea de distribución de reserva.

8. Por ejemplo, utilizar equipos de gran potencia o máquinas herramientas grandes.

Figura 17b
Esquema básico de un SFC



3.9. Operación y mantenimiento

Tal como se mencionó anteriormente el encendido y apagado de cada sistema fotovoltaico centralizado es extremadamente simple: a través de un interruptor tipo cerradura con llave. En cada zona de El Higueral existe un o una responsable de encender y apagar el sistema correspondiente a las horas determinadas por la comunidad y la UCA. En la actualidad, esta operación es efectuada por un equipo formado por mujeres y hombres que, dado que viven cerca de los sistemas, se ofrecieron para llevar a cabo esta labor.

El mantenimiento adecuado de los sistemas fotovoltaicos centralizados es un aspecto muy importante para garantizar una larga vida útil a los equipos, en especial a las baterías. La literatura suele presentar al bajo mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos como una de sus cualidades más importantes; esto es cierto si se tiene claro que bajo mantenimiento no significa nada o mal mantenimiento. Por el contrario, sin un mantenimiento oportuno y adecuado, los sistemas fotovoltaicos centralizados de El Higueral no podrán alcanzar su vida útil estimada. El Cuadro 9 muestra la distribución de las actividades de mantenimiento en la comunidad.

Cuadro 9
Distribución de actividades de mantenimiento

Actividad	Responsable
Mantenimiento de las líneas de distribución.	Cada familia es responsable del tramo de línea que llega hasta su casa.
Mantenimiento de las instalaciones eléctricas residenciales.	Cada familia es responsable de cuidar la instalación eléctrica de su vivienda.
Limpieza de la caseta de control.	Hay un comité especialmente encargado de esta actividad.
Limpieza de los paneles.	Hay un comité especialmente encargado de esta actividad.
Mantenimiento de baterías.	Hay un comité especialmente encargado de esta actividad.

4. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas hasta la fecha son, en primer lugar, los sistemas fotovoltaicos centra-

lizados (SFC) son una solución más eficiente para proveer energía eléctrica a comunidades rurales de El Salvador, si éstas poseen las siguientes caracte-

rísticas: aislamiento a corto o mediano plazo de la red eléctrica comercial, bajo consumo energético: iluminación básica, telefonía celular, radio y televisión, la mayoría de las casas están relativamente próximas y nivel de organización alto.

En segundo lugar, las ventajas más importantes de los sistemas fotovoltaicos centralizados de El Higueral en comparación con los individuales son las siguientes: inversión inicial relativamente menor (Figura 5); mayor robustez eléctrica: protecciones eléctricas más confiables, almacenamiento y uso de energía más eficientes, mayores opciones para la distribución de la energía, etc.; mejor calidad de energía servida al usuario: energía 120 VAC @ 60 Hz, que permite el uso de la mayoría de aparatos eléctricos de fácil adquisición en el mercado local.

En tercer lugar, los sistemas fotovoltaicos centralizados de El Higueral han permitido a la comunidad no sólo tener acceso a luz, sino que, además, a la telefonía celular inalámbrica. Este servicio ha demostrado ser de gran utilidad para la comunidad, debido a que muchos de sus habitantes necesitan comunicarse con sus parientes en Estados Unidos o en San Salvador. Ahora, en lugar de caminar 20 kilómetros e invertir todo el día para comunicarse telefónicamente con sus familiares, pueden hacerlo con facilidad con el teléfono celular de la comunidad.

En cuarto lugar, la universidad puede (y debe) aportar mucho a la solución apropiada de los problemas de El Salvador, dada su capacidad para conocer y buscar nuevas soluciones.

En quinto lugar, el proyecto de El Higueral permite potenciar el desarrollo económico y social de la zona, pues los sistemas fotovoltaicos centralizados, además de satisfacer las necesidades básicas de la población, tienen capacidad para proporcionar la potencia y energía necesarias para las actividades comunitarias con impacto económico: fiestas comunales, carga de baterías, telefonía celular, etc.

En sexto lugar, la pequeña extensión territorial de El Salvador permite a los investigadores movilizarse rápidamente para acompañar los procesos y evaluarlos intensivamente.

Finalmente, la experiencia de El Higueral ha despertado mucho interés en muchas comunidades rurales aisladas del país. Este proyecto es un eslabón de la serie de proyectos que la UCA desea realizar en el departamento de Chalatenango para evaluar los impactos tecnológicos, económicos y sociales de la energía solar fotovoltaica.

César Augusto Villalta Quijano
Jefe del Departamento de Electrónica
e Informática de la UCA

Bibliografía

- C. Villalta, "Generadores fotovoltaicos centralizados: Proyecto El Higueral". Curso-taller sobre sistemas híbridos solar-eólico, México, 2000.
- "Generadores fotovoltaicos DC/AC: proyecto El Higueral". Tesis de grado de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", mayo, 2000.