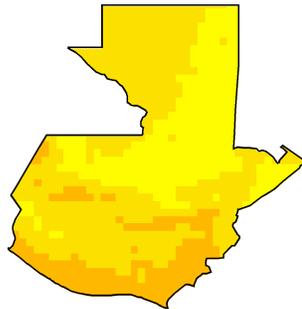


SWERA informe nacional

GEF
MEM DGE

Preparado por:
Ing. Norbert Bons
Borrador 14-11-05



Contenido

Prefacio	5
Resumen ejecutivo	6
Introducción	7
Datos socioeconómicos	7
Geografía y clima de Guatemala	7
Las energías renovables en Guatemala	9
La situación energética del país	13
Balance de energía de Guatemala	13
Marco institucional del sub-sector eléctrico	14
<i>Ministerio de Energía y Minas</i>	14
<i>Comisión Nacional de Energía</i>	15
<i>Administrador del Mercado Mayorista</i>	15
<i>Autoridad designada para los créditos de carbono</i>	16
Marco regulatorio del sub-sector eléctrico	16
<i>Ley general de electricidad</i>	17
<i>Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable</i>	17
Sistema eléctrico	17
<i>Generación</i>	17
<i>Transporte</i>	18
<i>Distribución</i>	19
Mercado eléctrico	20
<i>Despacho</i>	20
<i>Demanda de energía</i>	21
Electrificación rural	22
La energía solar	23
Características de la energía solar	23
Los productos solares del proyecto SWERA	26
<i>El mapa solar de 100 por 100 km</i>	27
<i>El mapa solar 40 por 40 km</i>	27
<i>El mapa solar 10 por 10 km</i>	28
<i>Otros datos sobre el recurso solar</i>	29
El recurso solar	31
El potencial solar	33
<i>Sistemas solares térmicos</i>	33
<i>Sistemas fotovoltaicos aislados</i>	37
<i>Sistemas fotovoltaicos interconectados</i>	38
<i>Sistemas solares termodinámicos</i>	40
<i>Otros sistemas solares</i>	41
La energía eólica	43

Características de la energía eólica	43
El mapa eólico del proyecto SWERA	45
El recurso eólico	46
El potencial eólico	47
<i>Sistemas aeroeléctricos interconectados</i>	47
<i>Sistemas eólicos aislados</i>	48
<i>Sistemas híbridos</i>	49
Desafíos para el desarrollo de las fuentes renovables en Guatemala	51
Programas y proyectos actuales	52
<i>PPP</i>	52
<i>TLC</i>	52
<i>GVEP</i>	53
Barreras para las energía renovables	53
<i>Barreras financieras-económicas</i>	53
<i>Barreras institucionales</i>	54
<i>Barreras de información</i>	54
<i>Barreras sociales</i>	55
Tecnologías más prometedoras	55
Prioridades solares	55
Prioridades viento	55
Glosario y Acrónimos	56
Bibliografía	57
Anexos	59
I. Análisis de un sistema solar térmico utilizando RETScreen	59
II. Análisis de un sistema híbrido utilizando HOMER	62
III. Productos SWERA	65
IV. Mapas del recurso solar	67
V. Mapas del recurso eólico	68

PREFACIO

En una época en la cual el precio del crudo de petróleo está subiendo a niveles sin precedente en la historia, el Ministerio de Energía y Minas presenta los resultados del proyecto, Evaluación de los Recursos de las Energías Solar y Eólica (SWERA por sus siglas en inglés) realizado con apoyo del Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP por sus siglas en inglés). Este proyecto aporta un insumo importante para la exploración de las fuentes de energía renovables de Guatemala: una base de datos integral de los recursos energéticos solares y eólicos del país.

El objetivo principal de presente documento es dar a conocer los resultados del proyecto SWERA. El documento presenta los datos obtenidos sobre los recursos solares y eólicos de Guatemala. Por otro lado, pretende ser una introducción a las energías renovables y sus aplicaciones, para inversionistas, interesados y el público en general, siempre con énfasis en las energías solar y eólica. Para completar el panorama se incluyó un capítulo sobre el sub-sector de energía eléctrica. Los datos mencionados en este documento se refieren al año 2004, si no se especifica otro año.

El proyecto SWERA es un programa de la Facilidad Global del Ambiente (GEF por sus siglas en inglés) con un presupuesto de US\$ 6.3 millones, que se llevó a cabo en 14 países en vías de desarrollo, en varios lugares del mundo.

Los productos del proyecto SWERA se presentan en forma de mapas y bases de datos de los recursos solares y eólicos. Un programa de información geo-espacial, desarrollado en el marco del proyecto, permite el acceso fácil a los datos detallados que contienen los mapas. Un listado completo de los productos del proyecto SWERA se encuentra en el anexo. Los datos también están disponibles al público a través del sitio de internet del proyecto y en el Centro de Información y Promoción de Energías Renovables (CIPER), de la Dirección General de Energía del Ministerio de Energía y Minas.

El capítulo 1 presenta brevemente datos socioeconómicos, la geografía y el clima de Guatemala y habla en forma general de los recursos renovables del país. El capítulo 2 presenta las estructuras del sector energético con el fin de que, quién no conozca el sector, pueda comprender la relevancia del tema de las energías renovables en el contexto nacional. Los capítulos 3 y 4 presentan los resultados del proyecto SWERA y el potencial nacional respectivamente de la energía solar y la energía eólica. El capítulo 5 expone los retos y los desafíos para el desarrollo de las energías renovables.

RESUMEN EJECUTIVO

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una breve reseña de las circunstancias socioeconómicas, topográficas y climatológicas de Guatemala. Se mencionan las fuentes de energías renovables del país, que no caben en el enfoque de este documento, y se discuten unas características generales de las energías renovables.

1.1 Datos socioeconómicos

Guatemala es el país más grande y más poblado de la región centroamericana. El sector agrícola es el sector económico más importante siendo el café, el azúcar y el banano los productos principales. Los acuerdos de paz del año 1996 removieron el mayor obstáculo para inversión extranjera, pero la confianza de posibles inversionistas sigue siendo baja por la corrupción y la continua violencia política.

El PIB es de US\$ 59,470 millones y tiene una tasa de crecimiento del 2.6 %. El PIB por cápita es de US\$ 4,200. La deuda del sector público es un 32 % del PIB.

La población se estima en 14.7 millones (julio 2005) y el crecimiento poblacional es de 2.6 %. Tres cuartos de la población vive en condiciones de pobreza, la distribución de riqueza es altamente desigual.

[Fuente: CIA World Factbook, actualizado hasta noviembre 2005]

1.2 Geografía y clima de Guatemala

El clima de una región está estrechamente vinculado con su topografía. Este capítulo expone brevemente las características geográficas y climatológicas de Guatemala. El texto fue tomado del Perfil Ambiental de Guatemala [IIA04].

La República de Guatemala limita al Norte y Oeste con México; al Este con Belice y el Mar Caribe, las Repúblicas de Honduras y El Salvador; al Sur con el Océano Pacífico. Su área es de 108,889 km²; se ubica entre los paralelos de 13° 44' y 18° 30' al Norte y meridianos 87° 30' y 92° 14' al Este de Greenwich. El mar territorial, que se extiende hasta 12 millas náuticas de la costa, tiene una extensión de 7,694 km².

La topografía del territorio es en su mayoría irregular, con altitudes que van desde el nivel del mar hasta 4,220 metros sobre el nivel del mar. Una cadena volcánica atraviesa el país de Oeste al Este. Tres volcanes tienen actividad periódica y otros seis presentan aguas termales.

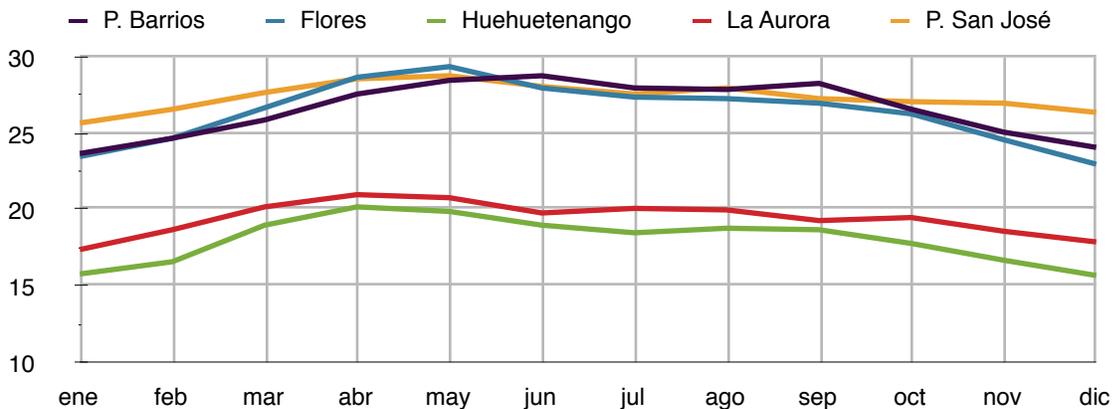
El país es atravesado por una cordillera dividida en dos ramales: el primero atraviesa los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Chimaltenango, Guatemala, Santa Rosa, Jalapa y Chiquimula y forma el sistema de la Sierra Madre, o sea el altiplano central del país; el segundo es el de los Cuchumatanes y atraviesa el país desde la frontera con México, Huehuetenango y Quiché hasta el Océano Atlántico. Las altiplanicies de esta cordillera son las de mayor elevación de Centroamérica, con altitudes mayores a los 3,000 metros sobre el nivel del mar.

Por la posición intercontinental del país y contar con dos masas oceánicas de gran proximidad, separadas por el sistema de cordilleras que atraviesan al país, se presentan varios climas y micro-climas, agrupados en seis regiones climáticas: Planicies del norte, Franja transversal del norte, Meseta y Altiplanos, Bocacosta, Planicie Costera del Pacífico y Zona Oriental.

La temperatura media al nivel del mar es de 27 °C para el Océano Pacífico y 28.2 °C para el Atlántico. A partir del nivel del mar, la temperatura media anual desciende alrededor de 0.6 °C por cada 100 m de ascenso. La humedad relativa varía desde un 60 % en el oriente hasta un 85 % en el norte, con un promedio nacional entre 70 % y 80 %. Vea figura 1 para los datos de cinco lugares.

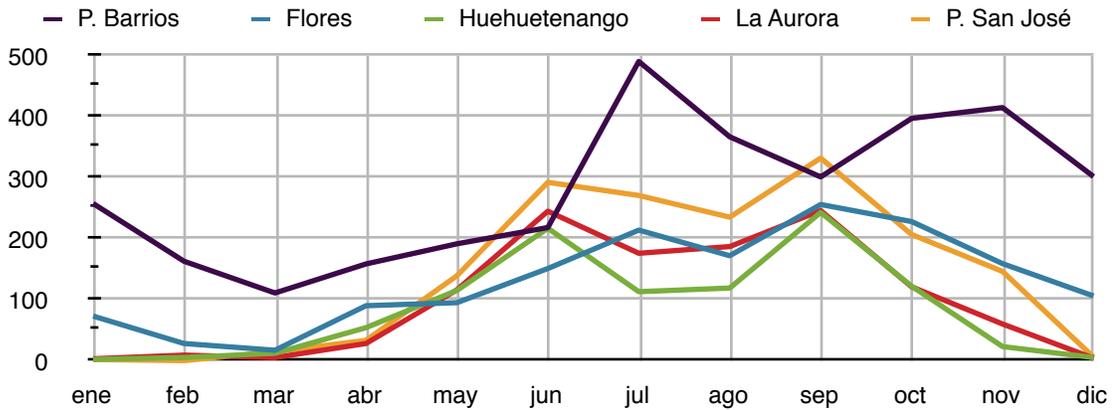
La estación de lluvias se presenta entre mayo y noviembre. Las precipitaciones de la zona norte oscilan entre los 1,525 mm y los 2,540 mm; la ciudad de Guatemala, en la montaña del sur, recibe cerca de 1,320 mm de promedio anual. Vea figura 2 para los datos de cinco lugares. La precipitación anual promedio en el país es de 2,034 mm, variando de 500 a 6,000 mm y generando una oferta hídrica volumétrica anual de 127 km³. Las aguas continentales del país drenan por tres vertientes hidrológicas: Pacífico, Mar Caribe y Atlántico, con un conjunto de 38 cuencas. Los ríos más importantes son el Usumacinta, Motagua, Sarstún, Ixcán y Polochic.

Figura 1: Temperatura media promedio mensual (°C).



Fuente: Insivumeh.

Figura 2: Precipitación promedio mensual (mm).



Fuente: Insivumeh.

1.3 Las energías renovables en Guatemala

Por las condiciones geográficas y climatológicas del país, Guatemala cuenta con amplios recursos renovables de energía. Las fuentes de energía renovable son las que no se agotan con su uso. Aparte de las energías solar y eólica, las cuales se presentan en los capítulos 3 y 4 respectivamente, el país cuenta con fuentes de energía hidráulica, biomásica y geotérmica.

Energías solar y eólica

Hasta la fecha, las energías solar y eólica se utilizan principalmente en aplicaciones de pequeña escala para la electrificación de casas, comunidades o instalaciones técnicas en lugares fuera del alcance de la red interconectada. En el área rural también se pueden encontrar aplicaciones de energía solar para el secado de productos agrícolas y para la pasteurización de agua. El bombeo eólico era común en el pasado en las zonas con viento, pero con el avance de la electrificación del país, las bombas eléctricas han desplazado estas aplicaciones. El calentamiento de agua a través de la energía solar está ganando el interés de las familias guatemaltecas en las zonas urbanas.

Energía hidroeléctrica

Con áreas montañosas y un alto índice de precipitación, Guatemala cuenta con buenas condiciones para tener altos recursos hídricos. La capacidad instalada actualmente es de 650 MW contribuyendo con 2,447 GWh la tercera parte de la producción de energía eléctrica. El portafolio de proyectos hidroeléctricos en estudio o implementación, alcanza los 1,500 MW que podrían generar más de 5,300 GWh por año [DGE03]. Por otro lado, existe un gran potencial de plantas micro y pico hidroeléctricas que pueden contribuir a la electrificación de comunidades rurales sin acceso a la red interconectada.

Figura 3: Hidroeléctrica.



Fuente: Volker Quaschnig.

El funcionamiento de una planta hidroeléctrica depende del caudal del río, el cual fluctúa mucho según las estaciones. Sin embargo, el caudal es más constante si la cuenca tiene la capacidad de retener el agua y esto depende entre otras cosas de la cobertura forestal. Por lo tanto el manejo de la cuenca es clave para la sostenibilidad de la planta hidroeléctrica a largo plazo.

A pesar de los beneficios que traen las plantas hidroeléctricas para el país y la cuenca, su desarrollo está enfrentando fuerte resistencia de grupos sociales de las comunidades donde se planea la construcción. Los vecinos temen que las instalaciones les hagan daño a ellos o a su hábitat. Es importante que los desarrolladores involucren a los vecinos desde el inicio del proyecto y que velen por una buena integración no solo técnica, sino también socioeconómica del proyecto en el entorno de las comunidades.

Energía biomásica

Guatemala es un país agrícola y la biomasa forma parte integral de este sector económico; de hecho, es la fuente de energía primaria más importante del país a causa de que la mayoría de las familias guatemaltecas usa leña para preparar sus alimentos. Según el balance energético, en el año 2004, el uso de leña contribuyó con un 40 % en la oferta bruta de energía [OLADE05].

La leña como combustible es utilizada en forma ineficiente, ya que aproximadamente el 80 % de los hogares que la consumen, utilizan las "Tres Piedras", que desaprovecha casi el 90 % de la energía consumida [BM02]. Cabe mencionar en este punto que en los poblados con bajas temperaturas, el calor del fogón abierto es aprovechado para mantener una temperatura confortable en el interior de las viviendas.

Figura 4: Estufa mejorada.



Fuente: Fundación Solar.

La energía biomásica obviamente solo se puede llamar renovable, si existe un balance entre el uso y el crecimiento de la materia orgánica. Lastimosamente, esto no es el caso de Guatemala: aunque el uso de leña para la cocción de alimentos no es la causa principal de la deforestación, se estima que el país ha perdido el 50 % de los bosques que existían en 1950 [IIA04] y el costo que pagan las familias en el área rural para el uso de la leña, sea monetario o en forma de labor, cada vez es mas alto. El uso de estufas ahorradoras de leña baja este costo considerablemente, según dicen las usuarias [BM02]. Desafortunadamente, no existen datos científicos al respecto.

Otro uso de la biomasa en Guatemala es la producción de energía eléctrica en las plantas cogeneradoras de los ingenios azucareros que utilizan el bagazo de caña de azúcar como combustible durante la época de zafra. La contribución de las plantas cogeneradoras a la producción de energía es de 188 MW durante los meses noviembre hasta mayo, generando alrededor de 190 GWh por año [AMM04].

El cultivo intensivo de caña de azúcar y otras plantas para la producción de biocombustibles es otra opción de la biomasa para usos energéticos, primordialmente para el sector de transporte. El Ministerio de Energía y Minas ha realizado algunos estudios sobre el tema en cooperación con la industria [fuente].

La conversión de la parte orgánica de los desechos sólidos en energía se suele denominar renovable. Existen varias maneras de aprovechar la energía de la parte orgánica de los desechos sólidos. Una manera de escala grande es la combustión de los desechos en una planta termoeléctrica. Esto requiere una logística e infraestructura que garantice la recolección y preparación y por ende un flujo estable y homogéneo de los desechos para su combustión. Obviamente, se queman las fracciones orgánicas e inorgánicas de los desechos. La potencia de una instalación de este tipo es de unos 10 MW o más. Se han desarrollado planes para la construcción de una planta de tratamiento de desechos sólidos en Guatemala, que hasta la fecha no se han podido realizar.

Por otro lado, se pueden recuperar los gases hidrocarbúricos que produce un relleno (basurero) a causa de la descomposición de los desechos orgánicos, gases que ahora salen desaprovechados a la atmósfera. Técnicamente, se cubre el relleno con un plástico y se conducen los gases hacia una planta eléctrica que funciona con un motor de gas. La potencia es de unos 100 kW.

Una tercera opción para el uso de desechos orgánicos es la fermentación de estiércol en biodigestores. Esta tecnología se presta para aplicaciones de pequeña escala en el área rural. Un biodigestor mejora la calidad del abono y produce gas metano que se puede usar para la cocción e iluminación. En Guatemala casi no hay experiencia con esta tecnología.

Energía geotermoeléctrica

Guatemala cuenta con dos plantas geotérmicas con una potencia total de 26.5 MW, generando casi 200 GWh por año. Existe un potencial estimado de mas de 200 MW [MEM]. En el sentido estricto de la palabra, la energía geotérmica no es una fuente renovable de energía, ya que la generación de la energía se basa en la extracción de vapor de depósitos subterráneos. Con el tiempo los pozos se agotan y se tienen que abrir pozos nuevos.

2 LA SITUACIÓN ENERGÉTICA DEL PAÍS

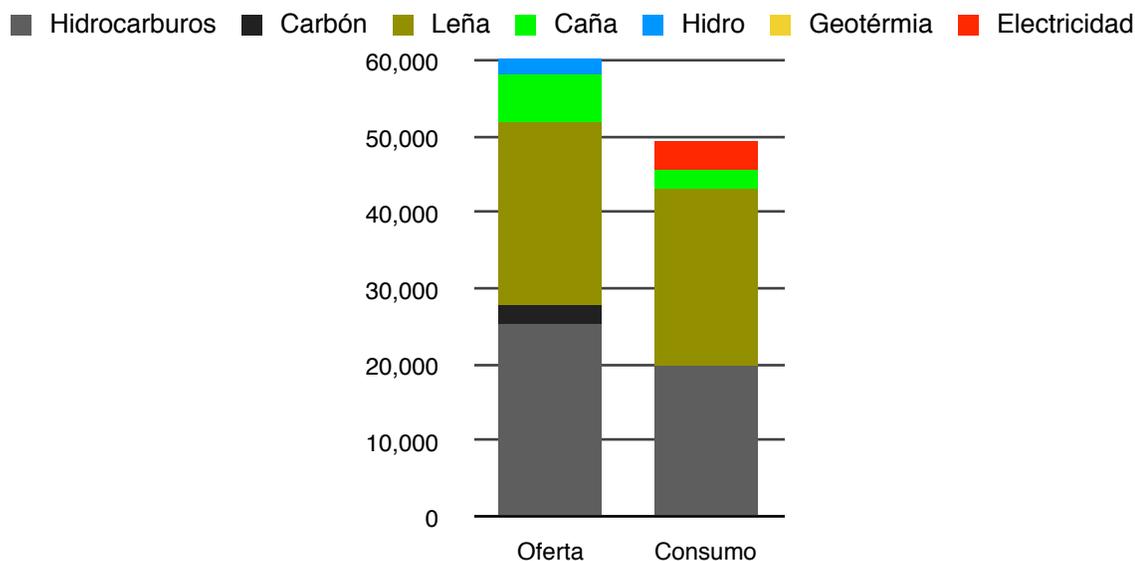
La importancia de las energías renovables solo se puede comprender en el contexto del sector energético del país. Como las aplicaciones de energía solar y eólica por lo general generan energía eléctrica, se enfoca en este capítulo en el sub-sector eléctrico. Sin embargo, es preciso mencionar que la energía eléctrica solo forma una parte del consumo final de energía.

2.1 Balance de energía de Guatemala

La organización latinoamericana de energía, OLADE, calculó la oferta nacional de energía para el año 2004 en 59,617 mil Bep¹. El consumo de energía se calculó en 49,291 mil Bep [OLADE05]. La diferencia entre oferta y consumo se explica por la transformación de recursos energéticos en productos no energéticos y, por otro lado, por pérdidas en la generación de energía eléctrica en plantas termoeléctricas.

El balance de energía, figura 5, muestra claramente que el sistema energético de Guatemala depende principalmente de los hidrocarburos y de la leña. El bagazo de caña también juega un papel importante. Solo un 14 % de la oferta energética se puede considerar renovable: la hidroenergía (3.3 %), la geotermia (0.2 %) y la caña (10.4 %). El uso actual de la leña no es sostenible como se ha mencionado anteriormente.

Figura 5: Balance de energía de Guatemala, 2004 (kBep).



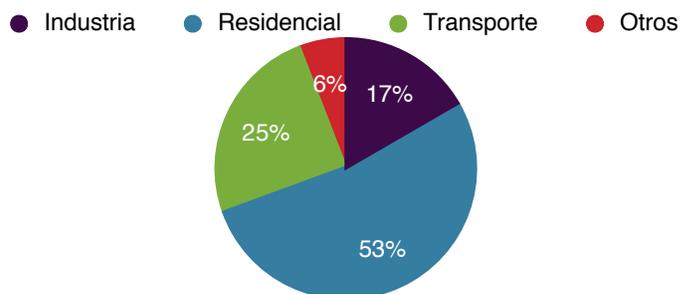
Fuente: OLADE, Balance energético Guatemala 2004.

¹ Bep = Barriles equivalentes de petróleo

El consumo de energía eléctrica alcanzó un 6,586 GWh en el año 2004, (lo cual equivale a 3,656 mil Bep²) y constituye solo el 8 % del consumo total. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que un 18 % de la oferta de hidrocarburos y todo el carbón mineral son utilizados para la generación de energía eléctrica.

La figura 6 muestra la participación sectorial en el consumo final de energía. Se puede observar que el sector residencial consume más de la mitad de la energía, debido al uso de leña como principal fuente de energía en los hogares rurales. Por otro lado, se ve que el sector de transporte consume mucho más que el sector industrial.

Figura 6: Participación sectorial en el consumo final de energía, 2004.



Fuente: OLADE, Balance energético Guatemala 2004.

2.2 Marco institucional del sub-sector eléctrico

La ley general de electricidad determina los aspectos asociados a la rectoría, la facilitación, la regulación y la coordinación comercial de las actividades del sub-sector eléctrico y las sustenta en un marco institucional conformado por tres entidades: el Ministerio de Energía y Minas, la Comisión Nacional de Energía Eléctrica y el Administrador del Mercado Mayorista.

2.2.1 Ministerio de Energía y Minas

Las actividades primordiales del Ministerio de Energía y Minas (MEM) están dirigidas a facilitar la realización de inversiones privadas en las diversas actividades del subsector. La Dirección General de Energía (DGE) formula y coordina las políticas, planes de Estado, programas indicativos relativos al sub-sector eléctrico, otorga las autorizaciones para la instalación de centrales generadoras y para prestar los servicios de transporte y de distribución final de electricidad y la constitución de servidumbres indefinida en los bienes de dominio público y privado.

El plan indicativo de DGE del año 2002 provee el desarrollo del sector eléctrico del año 2003 hasta el año 2010 y estipula las metas en cuanto a la demanda de potencia y energía, las consecuencias para el sistema eléctrico y sus sub-sistemas y la inversión necesaria para enfrentar el aumento de la demanda [DGE03].

² 1 MWh = 0.6196 Bep

Por otro lado, la DGE alienta el estudio y la utilización de los recursos renovables, gestiona los proyectos de la electrificación rural y promueve los cambios estructurales en las empresas eléctricas estatales, con el objetivo de maximizar la eficiencia.

Para promover la energía renovable, el MEM creó el Centro de Información y Promoción de la Energía Renovable (CIPER), el cual establece un servicio sostenible de captación, mantenimiento, actualización y suministro de información sistemática, consistente y confiable, que coadyuve a que los inversionistas puedan realizar estudios de factibilidad de proyectos de energías renovables en el país.

2.2.2 Comisión Nacional de Energía

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) es un organismo técnico del MEM, con independencia funcional, encargado de formular, implantar y fiscalizar el marco regulatorio y normativo que definen las reglas del juego del sub-sector eléctrico y la actuación de los agentes económicos que intervienen en el mismo. Así mismo, es encargado de la determinación de los precios y calidad de la prestación de los servicios de transporte y distribución de electricidad sujetos a autorización, y controlar y asegurar las condiciones de competencia en el Mercado Mayorista.

La CNEE vela por el cumplimiento de las obligaciones de los adjudicatarios, protege los derechos de los usuarios y previene conductas en contra de la libre empresa, así como prácticas abusivas o discriminatorias. Para ello, la CNEE emite las normas técnicas relativas al sub-sector eléctrico y fiscaliza su cumplimiento en congruencia con prácticas internacionales aceptadas, emite las disposiciones y normativas para garantizar el libre acceso y uso de las líneas de transmisión y redes de distribución, de acuerdo a lo dispuesto en la ley y su reglamento. Por otro lado, la CNEE define las tarifas de transmisión y distribución sujetas a regulación, así como la metodología para el cálculo de las mismas. En el caso de controversias, actúa como árbitro entre las partes cuando no hayan llegado a un acuerdo.

2.2.3 Administrador del Mercado Mayorista

El Administrador del Mercado Mayorista es una entidad privada sin fines de lucro, que coordina las transacciones entre los participantes del mercado mayorista de electricidad. Asegura las condiciones de competencia en un ámbito de libre mercado, con reglas claras, promoviendo así la inversión en el sistema eléctrico. Sus esfuerzos conjuntos están enfocados a la satisfacción de los clientes, es decir, a los participantes en el mercado mayorista de electricidad: generadores, transportistas, distribuidores, comercializadores y grandes usuarios de energía eléctrica.

El AMM programa, coordina y supervisa la operación y el despacho económico de carga de energía eléctrica, y calcula los precios horarios de corto plazo de energía en el Sistema Nacional Interconectado. Por otro lado, coordina y administra las transacciones entre los agentes y participantes del mercado mayorista.

La operación del Sistema Eléctrico Nacional se planifica, identificando las necesidades de potencia y energía eléctrica, bajo el concepto de seguridad de suministro y despacho económico. En este proceso, se determinan los precios de potencia y energía eléctrica a ser abonados por los agentes y participantes consumidores, se toman en cuenta las pérdidas en el sistema de transporte y se coordinan los programas de mantenimiento.

Para mejorar la capacidad de acción del Sistema Eléctrico de Guatemala a mediano y largo plazo, el AMM realiza estudios que permiten hacer las previsiones que los agentes requieren sobre la evolución del sistema y del mercado mayorista, con el apoyo de modelos de simulación.

Por otro lado, el AMM ofrece el servicio de asesoramiento, para nuevos participantes en el mercado mayorista, en el tema de los requisitos a satisfacer para integrarse al mercado mayorista.

2.2.4 Autoridad designada para los créditos de carbono

El protocolo de Kyoto promueve que los países industrializados (llamados países anexo I) pueden realizar parte de sus obligaciones en cuanto a la disminución de gases invernaderos a través del mecanismo para un desarrollo limpio MDL. Los proyectos MDL se realizan en países no anexo I, resultando en una transferencia de llamados créditos de carbono del proyecto hacia el país industrializado y una remuneración financiera hacia el proyecto que genera la disminución de gases invernaderos.

El país de acogida decide si un proyecto contribuye a su desarrollo económico y social. Es decir, que la participación en un proyecto del MDL es voluntaria y requiere la aprobación de una entidad designada. En Guatemala, la autoridad nacional designada del MDL es el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales MARN.

2.3 Marco regulatorio del sub-sector eléctrico

Las actividades del sector de energía eléctrica se rigen a la ley general de electricidad, su reglamento y las normas técnicas establecidas por los entes autorizados por la ley. Por otro lado, para las energías renovables es relevante la ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable y su reglamento.

Según lo preceptuado en la Constitución Política de la República, es obligación fundamental del Estado orientar la economía nacional para lograr la utilización de los recursos naturales, adoptando las medidas que sean necesarias para su aprovechamiento, en forma eficiente, sabiendo que el desarrollo de los recursos energéticos renovables es de interés público.

2.3.1 Ley general de electricidad

La ley general de electricidad (Decreto No. 93-96) y su reglamento (Acuerdo Gubernativo No. 256-97) norman el desarrollo del conjunto de actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad, de acuerdo a principios y enunciados que son aplicables a todas las personas individuales o jurídicas, con participación privada, mixta o estatal. Con la finalidad de transparentar las actividades de los agentes del mercado, establece que éstos al efectuar simultáneamente las actividades de generación, transporte y/o distribución de energía eléctrica, deben realizarlo a través de empresas o personas jurídicas diferentes.

El principio general de la ley de electricidad es que son libres la generación, el transporte y la distribución privada de energía eléctrica, tanto como los precios de la prestación del servicio de energía eléctrico. Sin embargo, están sujetos a autorización: el transporte de electricidad que implique la utilización de bienes de dominio público y el servicio de distribución final de electricidad. Están sujetos a regulación las transferencias de energía entre generadores, comercializadores, importadores y exportadores que resulten de la operación del mercado mayorista.

2.3.2 Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable

Para promover el uso de las fuentes de energía renovable, el gobierno decretó la ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable (Decreto No. 52-2003). La ley establece incentivos fiscales, económicos y administrativos para el efecto. El desarrollador de un proyecto calificado puede aplicar a exenciones de impuestos, que incluyen derechos arancelarios e IVA sobre importaciones de equipo y, a partir del inicio de operaciones comerciales y durante un máximo de diez años, el ISR y el IEMA. El reglamento de ley (Acuerdo Gubernativo No. 211-2005) establece los requisitos y procedimientos de aplicación.

2.4 Sistema eléctrico

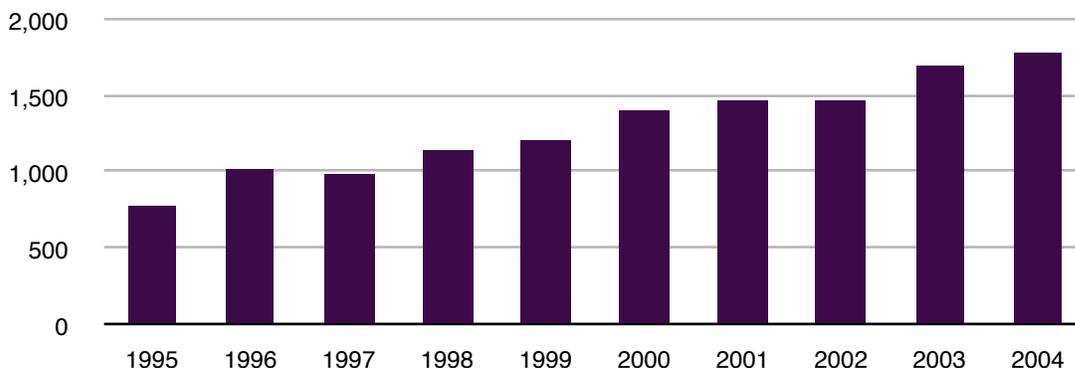
El sistema eléctrico consiste de los sub-sistemas de generación, transporte y distribución, que a través de un sistema de control de varios niveles aseguran el flujo continuo de energía eléctrica hacia los usuarios, desde el suministro de las plantas generadoras con energía primaria, las transformaciones de energía, el transporte y la distribución y todas las actividades técnicas, administrativas y económicas que involucra a ello.

2.4.1 Generación

El sistema generador está conformado por todas las unidades generadoras, propiedad de empresas públicas y privadas que están interconectadas al Sistema Nacional Interconectado (SNI) y las que operan dando servicio a sistemas aislados. Generadores con una potencia firme de por lo menos 10 MW pueden ser agentes del mercado mayorista. La potencia firme es la máxima potencia que un generador puede vender en virtud de un contrato.

Para cubrir la demanda del SNI, los participantes en el mercado mayorista presentan una capacidad instalada de 1,785 MW. La figura 7 muestra el desarrollo de la capacidad instalada en la última década. La demanda máxima de potencia registrada para el SNI ocurrió el día 6 de diciembre de 2004 y fue de 1,255.8 MW. Estos datos no incluyen la capacidad de generadores que no operan en el mercado mayorista, como las empresas municipales y los productores que generan para el autoconsumo.

Figura 7: Historial de la potencia instalada en el SNI (MW).



Fuente: MEM, AMM.

Considerando, que la capacidad instalada de las centrales hidroeléctricas no ha cambiado significativamente en los últimos 15 años, la contribución de la energía hidroeléctrica a la generación ha bajado de más del 60 % en 1991 a 37 % en 2004. Sin embargo, las plantas hidroeléctricas todavía constituyen el factor principal en la capacidad instalada como se puede apreciar en la figura 8.

Figura 8: El parque generador eléctrico.

Tecnología	Potencia(MW)	
Hidroeléctrica	650	36 %
Geotérmica	27	2 %
Turbina de vapor	143	8 %
Turbina de gas	185	10 %
Motores de combustión interna	593	33 %
Cogeneración	188	11 %
Total	1,785 MW	100 %

Fuente: Informe estadístico AMM 2004.

2.4.2 Transporte

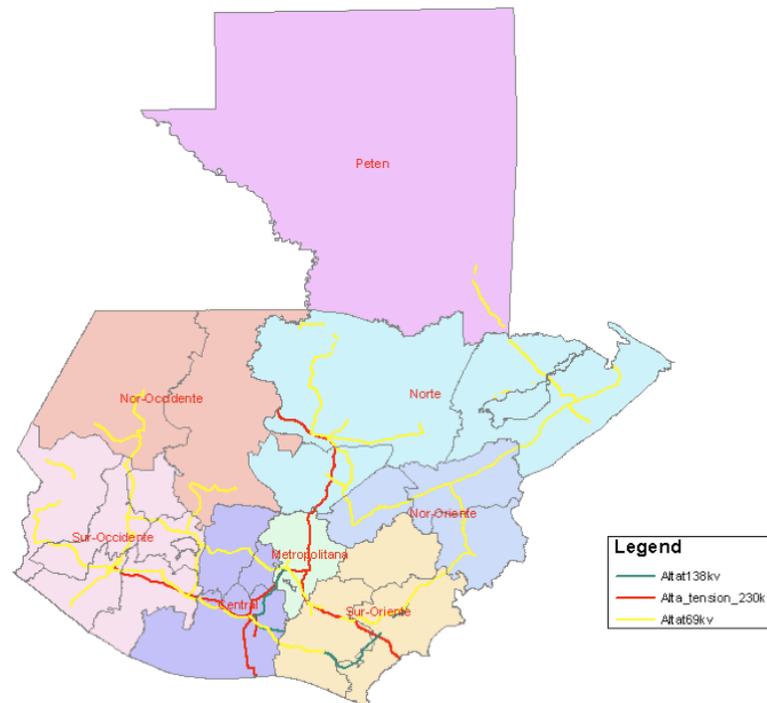
El sistema de transporte que corresponde al Sistema Nacional Interconectado está dividido geográficamente en tres áreas: Central, Occidental y Oriental. La red de transporte opera básicamente en tres niveles de voltaje: 230, 138 y 69 kV. La figura 9 muestra el sub-sistema de transporte.

Las líneas en 230 kV, operadas por la Empresa de Transporte y Control de Energía Eléctrica (ETCEE) del INDE, forman la red troncal del sistema y entrelazan las plantas más importantes, las sub-estaciones de transformación de mayor demanda de potencia (Guatemala Sur, Guatemala Este, Guatemala Norte, Escuintla y Los Brillantes), y el Sistema Salvadoreño por medio de una línea que va desde la sub-estación Guatemala Este a la sub-estación de Ahuachapán.

Las líneas energizadas en 138 kV refuerzan la transmisión de potencia entre Escuintla y Guatemala Sur; y entre las áreas Central y Oriental. Las líneas energizadas en 69 kV se extienden desde el sistema Central hacia los sistemas Oriental y Occidental enlazando las sub-estaciones de transformación que alimentan los circuitos de distribución del interior de la República.

La Empresa Eléctrica de Guatemala, EEGSA, opera en su área de servicio, localizada en la zona central del país que abarca los departamentos Guatemala, Escuintla y Sacatepéquez, redes de 230 kV, 69 kV y 13.8 kV, y 44 sub-estaciones de 69 kV.

Figura 9: Sub-sistema de transporte.



Fuente: MEM.

2.4.3 Distribución

El sistema de distribución principalmente está conformado por tres empresas privadas y 16 municipales. Existen otras empresas privadas que prestan servicio de distribución final y privada.

La Empresa Eléctrica de Guatemala EEGSA presta servicio eléctrico en el área central del país, es decir, en los departamentos de Guatemala, Escuintla y Sacatepéquez. La Distribuidora de Electricidad de Occidente, S.A. DEOCSA presta servicio eléctrico en los departamentos del occidente del país (Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu, San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Chimaltenango, Quiché y Huehuetenango.) La Distribuidora de Electricidad de Oriente, S.A. DEORSA presta servicio eléctrico en los departamentos del oriente del país (Petén, Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Progreso, Zacapa, Izabal, Chiquimula, Jalapa, Jutiapa y Santa Rosa).

Las siguientes municipalidades cuentan con una Empresa Eléctrica Municipal: Huehuetenango, Santa Eulalia, San Marcos, San Pedro Sacatepéquez, Tacaná, Quetzaltenango, Retalhuleu, Joyabaj, Playa Grande, Sayaxché, Guastatoya, Jalapa, San Pedro Pinula, Zacapa, Gualán y Puerto Barrios.

2.5 Mercado eléctrico

2.5.1 Despacho

Los costos de operación de las plantas generadoras dependen de sus características técnicas y del precio del combustible. Aparte de una capacidad máxima, muchas plantas también tienen una capacidad mínima para operar. Las turbinas de vapor son económicas, pero tienen una inercia térmica alta, así que trabajan en la base de la generación, produciendo continuamente grandes cantidades de energía a bajo costo. En cambio, turbinas de gas son relativamente caras, pero tienen poca inercia y son capaces de seguir fluctuaciones rápidas de la demanda. Aparte, las plantas pueden estar fuera de servicio por mantenimiento y problemas técnicos. Por otro lado, para plantas de energía renovable, como una central hidroeléctrica, la disponibilidad del recurso es un factor determinante para su operación.

La demanda y oferta de energía en el SNI deben estar en balance en cada momento; el sistema eléctrico no tiene la capacidad de acumular energía. Para enfrentar la demanda y seguir sus fluctuaciones en cada momento, el sistema generador utiliza un medio de control técnico y administrativo que permite el despacho adecuado y eficiente de las plantas generadoras. El AMM planifica la demanda para cada día en base de los programas que entregan los usuarios grandes y las distribuidoras de energía eléctrica y despacha las plantas generadoras buscando el menor costo.

La curva diaria de la demanda tiene una base nocturna, sube entre las 5 y las 10 a un nivel diurno y llega a un pico entre las 7 y 8 de la noche. El precio de la energía es el resultado de la relación entre demanda y oferta, la cual varía según la hora del día. El promedio anual del precio de oportunidad de la energía del Mercado Mayorista fue de 48.81 US\$/MWh.

Los participantes en el mercado de energía eléctrica se comprometen a comprar y vender a las horas contratadas. El incumplimiento resulta en un costo extra porque el AMM tiene que compensar el desbalance.

2.5.2 Demanda de energía

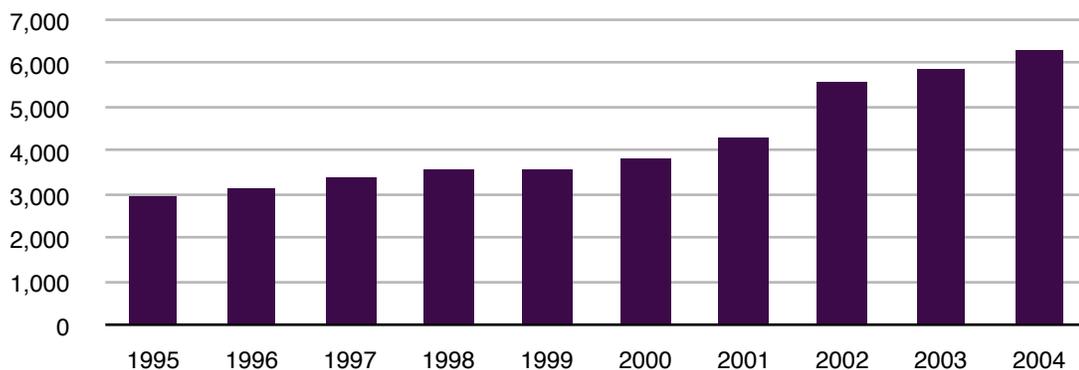
Según el informe estadístico del AMM, la generación de energía local dentro del SNI alcanzó los 7,009 GWh en el año 2,004, de los cuales el 36.3 % fueron de origen hidráulico, 60.9 % de origen térmico y 2.8 % de origen geotérmico.

El consumo local de energía alcanzó los 6,322 GWh, con un crecimiento del 7.02 % respecto al año anterior. Las pérdidas en los sistemas de transmisión fueron de 264 GWh, que representan un 3.7 % de la generación total.

La exportación de energía al Mercado Eléctrico Regional (MER) fue de 464 GWh, con lo cual el país alcanzó un 42.1 % de participación en las inyecciones de energía en el MER representando esto un 7.3 % del consumo local. La participación en los retiros de energía en el MER fue del 3.4 % debido a una importación de energía de 41 GWh. Por lo tanto, Guatemala resultó exportador neto al MER con 423 GWh.

El consumo diario máximo de energía registrado para el Sistema Nacional Interconectado ocurrió el día 10 de diciembre de 2004 y fue de 19.41 GWh. La capacidad instalada operable del sistema al final del año fue de 1,785.4 MW. El factor de carga anual calculado para el sistema fue de 59.7 %.

Figura 10: Historial de la demanda nacional (GWh).



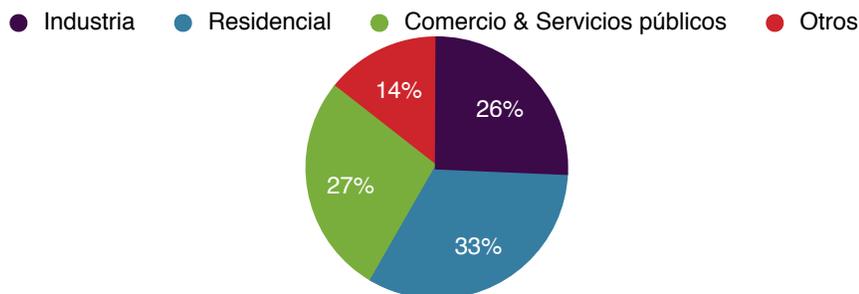
Fuente: MEM, AMM.

Como otros países en vías de desarrollo, Guatemala presenta un crecimiento fuerte de la demanda de energía eléctrica, sobre todo en los últimos años. La regulación del mercado eléctrico seguramente ha contribuido a este desarrollo. La demanda eléctrica se duplicó durante la última década. La figura 10 muestra el desarrollo histórico de la demanda.

En base de un estudio de escenarios, el MEM pronostica que la demanda alcanzará el 1,967 MW y el 10,407 MWh, respectivamente, en el año 2010. El estudio indica que la base de la curva de demanda está cubierto por el parque generador existente y los reemplazos de harán durante el período. Sin embargo, para poder cumplir con los pico de demanda, se necesitarán 90 MW por año adicionales en el período 2004 - 2007 [DGE03].

La figura 11 muestra la participación en el consumo de energía eléctrica de varios sectores [OLADE05]. Una tercera parte del consumo es residencial. El sector industria y el sector de comercio y servicios públicos constituyen cada uno cuarto del consumo.

Figura 11: Participación sectorial al consumo de energía eléctrica, 2004.



Fuente: OLADE, Balance energético Guatemala 2004.

2.6 Electrificación rural

Para llevar los beneficios de la energía eléctrica al área rural, el MEM ha desarrollado proyectos para la electrificación rural. En la última década, la cobertura nacional subió del 50 % hasta el 85 %. Esto ha contribuido a que el número de usuarios en esa misma época haya aumentado de un millón a dos millones de familias. Entre los departamentos con menor cobertura están, Alta Verapaz, Petén e Izabal.

Entre 2000 y 2003 se han conectado 145,000 usuarios en el marco del Plan de Electrificación Rural (PER). Para lograr las metas del PER de incrementar la cobertura eléctrica al 88 % en el 2004 al 91 % en el 2006, hace falta la conexión de 134,000 usuarios.

La unidad administrativa de DGE, Coordinadora de Electrificación Rural (CODERURAL), encargada de la coordinación del desarrollo de los programas de electrificación rural ejecutados por los entes gubernamentales y no gubernamentales, define las prioridades de comunidades a electrificar por semestre, en función de las características técnicas del sistema y prioridades gubernamentales.

CODERURAL vela por el cumplimiento a la ejecución del Fideicomiso de Administración INDE que financia gran parte del PER (280,000 usuarios) y el cumplimiento de la obligación de las empresas adjudicatarias del servicio de distribución final de electricidad, de suministrar el servicio dentro de la franja de 200 metros en torno a sus instalaciones.

Aparte de la electrificación a través de la extensión de la red interconectada, hasta finales del 2002, el MEM ha gestionado la instalación de 2,972 paneles solares que proporcionan energía eléctrica a igual número de familias en el área rural. El programa del MEM considera en forma preliminar la instalación de 4,000 paneles solares en el período 2003-2006, en los departamentos de Huehuetenango, Petén, Alta Verapaz, Chiquimula, San Marcos y Jutiapa.

3 LA ENERGÍA SOLAR

A parte de la fotosíntesis para la energía biomásica, la energía solar se puede aprovechar convirtiéndola en energía térmica o en energía eléctrica. La energía térmica se genera a través de colectores solares para el calentamiento de aire en procesos de secado o calefacción, para el calentamiento de agua u otros líquidos en usos domésticos y procesos industriales o para la energización de aparatos termodinámicos. La energía eléctrica se genera a través de módulos fotovoltaicos, también llamadas paneles o plantas solares.

Este capítulo presenta el recurso solar de Guatemala y el potencial para su aprovechamiento. Inicia con una breve introducción y la definición de unos términos y magnitudes que se usan para caracterizar el recurso.

3.1 Características de la energía solar

En términos físicos, la energía solar es la energía procedente del sol. En el contexto de las energías renovables, entendemos por energía solar la luz solar que incide en la tierra en sus componentes visibles e invisibles (infrarrojo y ultravioleta).

La intensidad del flujo energético solar que incide en la tierra depende de la latitud del sitio: mientras más cerca del ecuador, la luz incide de forma más perpendicular en la tierra, es decir con una intensidad mas alta. Por otro lado, la intensidad varía según la época del año, el momento del día y las condiciones atmosféricas. La magnitud que describe la intensidad de la radiación solar, se conoce como radiancia o irradiancia y se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2). En términos populares también se dice brillo solar. En este documento se usará el término *irradiancia*.

Fuera de la atmósfera, la irradiancia tiene un valor que se admite actualmente como de $1,354 W/m^2$ con variaciones de alrededor de $50 W/m^2$ según varía la distancia entre la tierra y el sol. Cuando el cielo está completamente despejado, la irradiancia es de alrededor de $1,000 W/m^2$. Es decir que la cuarta parte de la energía procedente del sol es amortiguada por la atmósfera.

Cuando se habla de la energía solar, normalmente se refiere a la insolación, es decir a la radiación o irradiación solar. Físicamente, por radiación se entiende: a) el transporte de energía en forma de ondas electromagnéticas o; b) esa misma energía. En el contexto de los recursos energéticos renovables, el término *radiación* se usa para cuantificar la densidad superficial de energía solar incidente en una superficie plana. Por lo general, se entiende por radiación solar el promedio diario de la irradiancia que incide sobre una superficie plana de un metro cuadrado. La radiación se mide entonces en vatio-horas por metro cuadrado (Wh/m^2).

La radiación terrestre se mide con un piranómetro usando dispositivos para separar la radiación directa de la indirecta. La medición requiere mucho cuidado porque los reflejos de obstáculos en el entorno del medidor pueden influir a las mediciones.

Figura 12: Piranómetros para la medición de la radiación directa e indirecta.



Fuente: Volker Quaschnig.

Los promedios se calculan sobre series de datos históricos. Es importante notar que el promedio tiene un componente espacial y un componente temporal. El componente espacial se refiere al área dónde tiene validez el valor, puede ser un sitio puntual o un territorio más extenso. De la misma manera, el componente temporal se refiere a la época en la cual es válido el valor, puede ser un mes, una estación o un año. Por ejemplo, la radiación promedia anual que incide en el territorio de Guatemala es alrededor de 5 kWh/m^2 por día. Sin embargo, los promedios mensuales varían de 3.5 kWh/m^2 en Petén en el mes de diciembre hasta 7.5 kWh/m^2 en San Marcos en el mes de abril.

Otra manera de cuantificar el recurso solar es en forma de horas sol equivalentes o simplemente *horas-sol*. El sentido práctico de esta magnitud es que una hora de pleno sol que incide en una superficie, equivale a alrededor de 1 kWh de energía. Por ejemplo, una radiación de 5 kWh/m^2 por día, equivale a 5 horas de pleno sol. Las horas-sol facilitan el diseño preliminares de sistemas fotovoltaicos, porque el cálculo de la energía que genera el sistema (Wh), se reduce al producto de la potencia máxima del sistema (W) y las horas-sol (h).

Hay que tomar nota de que en la meteorología se usa el mismo término para expresar el número de horas por día durante las cuales el sol está visible, lo cual no es lo mismo que la magnitud de horas-sol que se usa en este contexto.

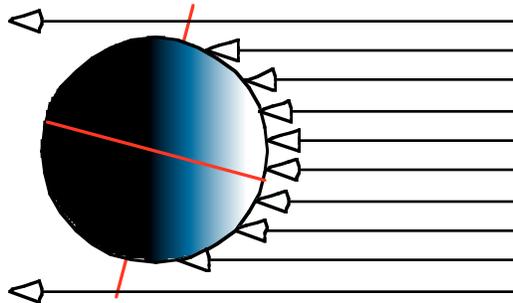
Como dicho anteriormente, la irradiancia (brillo solar) y la radiación describen el recurso solar en términos de potencia (vatios) y energía (vatios-hora) respectivamente. Para su uso en sistemas solares es necesario definir a qué se refieren estas magnitudes y como se pueden aprovechar. El término sistema solar se refiere a cualquier equipo o dispositivo para la conversión de energía solar en otra forma de energía aprovechable.

Para el diseño técnico de la mayoría de los sistemas solares, la radiación proporciona el dato más importante, porque representa la energía que se puede aprovechar. Este dato permite realizar un diseño básico del sistema. La irradiancia, en función de la hora del día, puede contribuir al entendimiento de las características dinámicas del sistema solar y permite afinar el diseño técnico.

La radiación es aprovechable en sus componentes directa y difusa. La radiación *directa* es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La radiación *difusa* RD es aquella que está presente en la atmósfera gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar de las nubes y otros elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa es direccional y puede reflejarse y concentrarse, mientras que la difusa no, pues es omni-direccional.

La radiación es la energía solar que incide en una placa plana de un metro cuadrado. Como la posición de la tierra con respecto al sol cambia constantemente, el ángulo de incidencia de la luz solar sobre la superficie cambia según la hora del día y según el día del año. Por eso, la orientación y la inclinación de la superficie determinan la cantidad de energía solar que recibe.

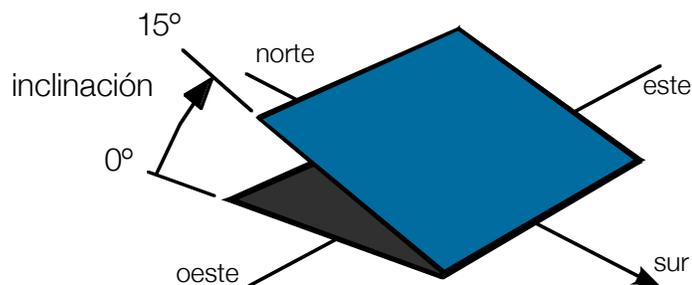
Figura 13: La iluminación del planeta.



Fuente: Autor.

La inclinación es el ángulo de la placa con respecto a la superficie horizontal. La inclinación influye sobre los promedios mensuales y anuales, siendo la inclinación igual a la latitud del sitio, la que genera la mayor energía anual. Variando la inclinación se puede mejorar el rendimiento del sistema en ciertos meses a costo del rendimiento en otros meses. De la misma manera, la orientación influye en la captura de energía en el transcurso del día. Normalmente, la orientación de sistemas solares es hacia el sur, lo cual genera la cantidad máxima de energía en el día.

Figura 14: Inclinación y orientación de la placa plana.



Fuente: Autor.

En la práctica, la mayoría de los sistemas tiene ángulos de orientación e inclinación fijos, porque el costo de una estructura de soporte que permita variar los ángulos, es muy alto. Sin embargo, existen sistemas solares que siguen al sol, con dispositivos llamados seguidores (trackers en inglés), mejorando considerablemente la captura de energía. Los seguidores pueden ser de un eje (solo varía la orientación o la inclinación) o de dos ejes (varían la orientación y la inclinación).

Para la caracterización del recurso solar y su aprovechamiento en sistemas solares, se introducen tres formas de presentar la radiación solar, que tienen que ver con cómo se alinea la placa plana hacia el sol.

Como una caracterización general del recurso solar se usa la *radiación global horizontal* (RGH), es la suma de los componentes directo y difuso de la energía solar que incide en una superficie plana sobre la tierra. El ángulo de inclinación es igual 0° , la orientación es irrelevante en este caso. Es un dato general sobre el recurso que, sobre todo, es de utilidad para los sectores agroforestal y de arquitectura.

Para el diseño de sistemas fotovoltaicos, de calentamiento de agua y otros como secadores solares, se usa la *radiación global con ángulo de inclinación igual latitud* (RGL). Estos dispositivos por lo general tienen una inclinación con un ángulo igual a la latitud o más. Para Guatemala el ángulo de inclinación adecuado sería alrededor de 15° .

Para sistemas que usan seguidores de dos ejes y algún dispositivo para la concentración de energía, se usa la *radiación directa normal* (RDN), la cual representa la energía de la luz solar directa en una superficie plana de un metro cuadrado cuya orientación y inclinación siempre están perpendiculares a la luz solar.

3.2 Los productos solares del proyecto SWERA

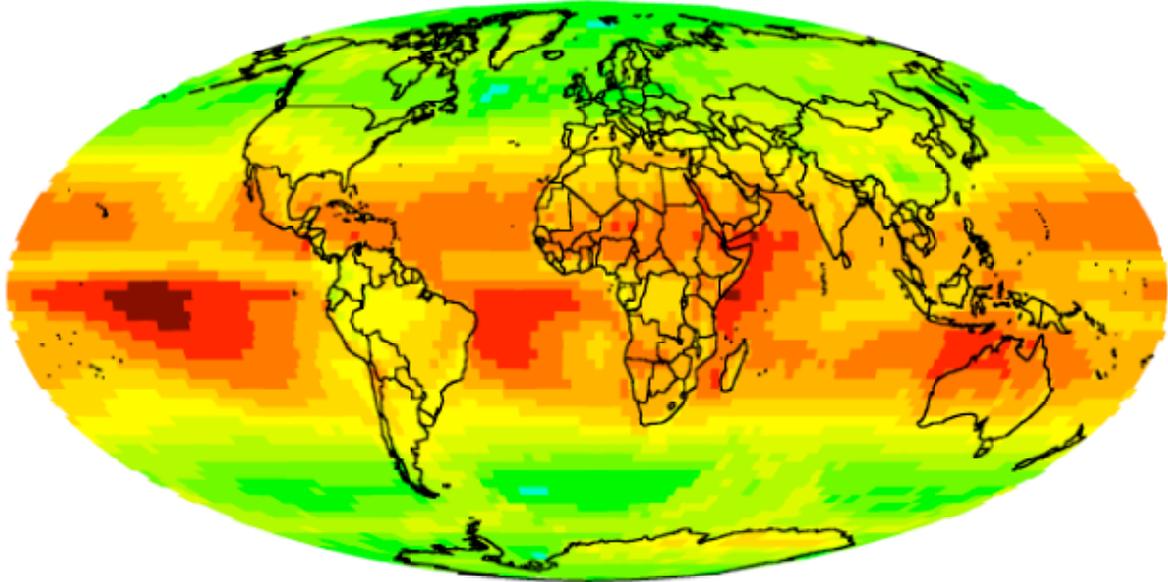
El proyecto SWERA generó dos conjuntos de datos y mapas del recurso solar de Guatemala. Un conjunto de datos de resolución mediana fue elaborado por el laboratorio nacional de energía renovable (NREL por sus siglas en inglés) en Estados Unidos. Este conjunto incluye promedios mensuales y anuales sobre una rejilla de 40 por 40 km de la radiación directa normal (RDN), la radiación global horizontal (RGH), la radiación difusa (RD) y la radiación global con ángulo de inclinación igual latitud (RGL). NREL también generó un conjunto de datos del año meteorológico típico y un mapa de resolución baja sobre datos de la NASA.

Otro conjunto de datos de resolución alta fue elaborado por la universidad estatal de Nueva York (SUNY por sus siglas en inglés). Incluye promedios mensuales y anuales sobre una rejilla de 10 por 10 km de la radiación directa normal y la radiación global horizontal. SUNY también generó series temporales para lugares específicos.

Los productos del proyecto SWERA son accesibles para el público en general en el sitio Internet <http://swera.unep.net>. Hasta la fecha, solo una parte del sitio fue traducido al idioma castellano. Un listado de los productos se encuentra en el anexo.

3.2.1 El mapa solar de 100 por 100 km

Figura 15: Radiación Global Horizontal, promedio anual.



Fuente: SWERA, NASA.

La base de datos de NASA/Langley, disponible para el proyecto SWERA, incluye observaciones satelitales de una época de 10 años y provee en promedios diarios y mensuales de la radiación global horizontal sobre una rejilla de aproximadamente 280 por 280 km. Los datos son accesibles a través del internet. La página provee datos promedios mensuales de la energía solar en la superficie de la tierra (SSE por sus siglas en inglés).

<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>

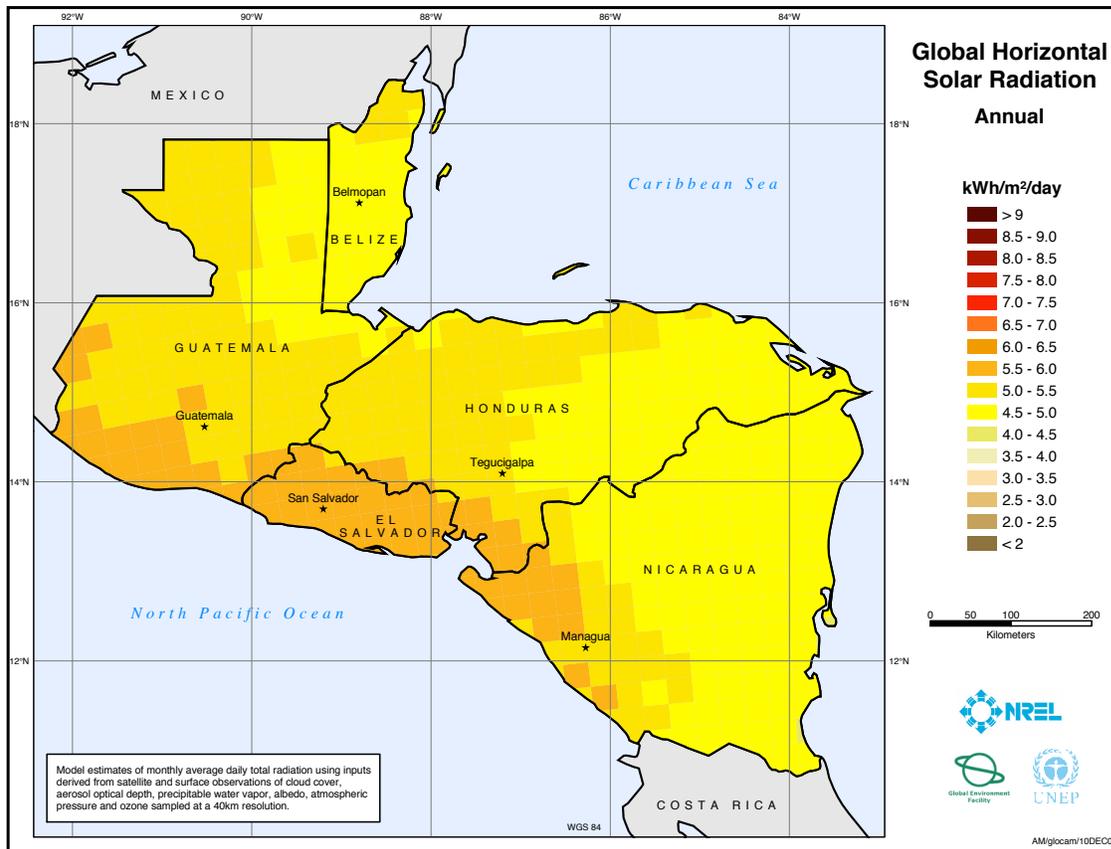
Sobre ésta base de datos, NREL calculó un mapa solar mundial preliminar, el cual será mejorado para salir sobre una rejilla de 100 por 100 km. Los datos sirven para localizar regiones con mayor recurso solar. Además sirven como referencia para los mapas nuevos de resolución alta.

3.2.2 El mapa solar 40 por 40 km

Los mapas solares con una resolución de 40 por 40 km fueron desarrollados por NREL, aplicando su modelo de radiación solar climatológica (CSR por sus siglas en inglés). El modelo calcula el promedio mensual de las componentes de la insolación terrestre diaria para celdas de aproximadamente 40 por 40 km. El modelo se basa en datos sobre la nubosidad, el contenido de vapor de agua y de gases atmosféricos y la concentración de aerosoles en la atmósfera. Los datos provienen de observaciones satelitales usando registros de los años 1985 hasta 1991.

Los resultados incluyen datos anuales y mensuales de la radiación directa normal, la radiación global horizontal y la radiación difusa. Con un algoritmo matemático se calculó la radiación sobre un colector con inclinación de latitud. Los resultados se presentan en Wh/m² en un formato delimitado que se puede importar en MS Excel. Figura 16 presenta la radiación global horizontal anual. Otros mapas se encuentran en el anexo.

Figura 16: Radiación Global Horizontal anual con una resolución de 40 por 40 km.

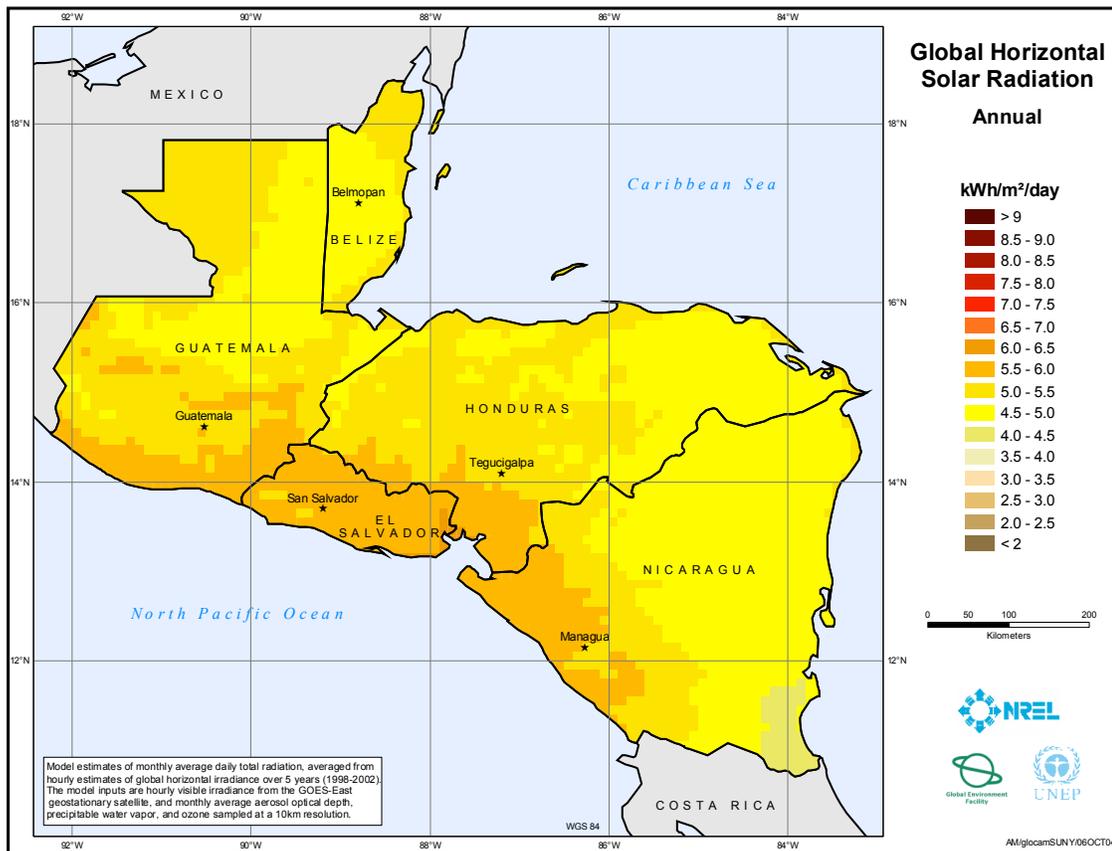


Fuente: SWERA.

3.2.3 El mapa solar 10 por 10 km

Los mapas solares con una resolución de 10 por 10 km se calcularon con el modelo solar de SUNY. El modelo calcula datos promedios horarios, diarios y mensuales de la radiación directa normal, la radiación global horizontal y la radiación difusa en base de registros de 1998 hasta 2002 de los satélites GOES. El modelo usa datos satelitales horarios de la irradiancia visible, el vapor de agua y gases atmosféricos y la concentración de aerosoles en la atmósfera. Se usaron datos de mediciones de referencia de las estaciones meteorológicas de La Aurora, Huehuetenango y Flores para la verificación del modelo.

Figura 17: Radiación Global Horizontal anual con una resolución de 10 por 10 km.



Fuente: SWERA.

El margen de error de los valores calculados con este modelo es del 12 % aproximadamente con respecto a mediciones terrestres. Además, el margen de error crece con la distancia entre el sitio calculado y el sitio de referencia. El factor limitante es la exactitud de las observaciones satelitales. Por otro lado, la nubosidad local y con eso la radiación local, puede variar de manera significativa dentro de una celda de la rejilla a causa de micro climas.

Los resultados incluyen mapas en formato .pdf y bases de datos en formato .shp que se pueden consultar y modificar con por ejemplo Arcview. Las tablas de datos tienen el formato dbase, el cual se puede importar en Excel. Los resultados se expresan en kWh por m² por día para cada mes calendario. Figura 17 presenta la radiación global horizontal anual. Otros mapas se encuentran en el anexo.

3.2.4 Otros datos sobre el recurso solar

Año meteorológico típico

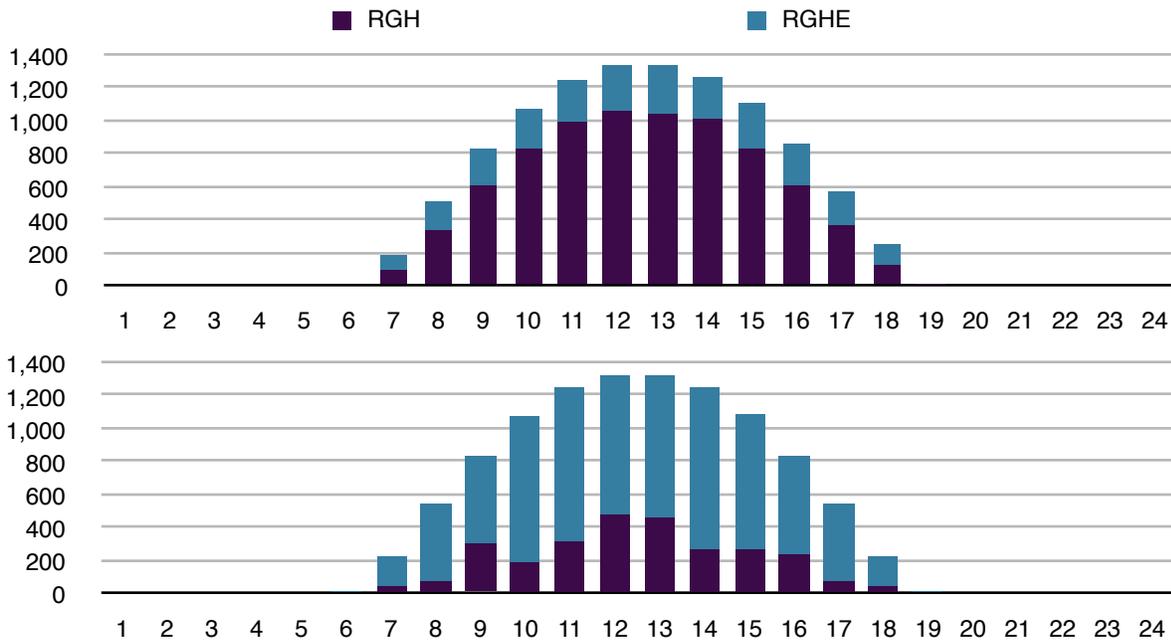
El año meteorológico típico es un conjunto de datos de 365 días, construido en base de series largas de mediciones (más de 20 años), seleccionando y concatenando meses de varios años para formar un año modelo. Representa una base estándar de datos horarios del recurso como, entre otros, la radiación directa normal, la radiación global horizontal, la radiación difusa y por otro lado, otros datos meteorológicos como la temperatura, visibilidad, presión atmosférica, etc.

Un año meteorológico típico puede utilizarse para realizar simulaciones de sistemas solares y comparar, por ejemplo, el desempeño de varios sistemas o de un sistema en diferentes sitios. No es útil para el diseño de sistemas porque no contienen datos extremos. Por su carácter de ser un conjunto de datos construido, tampoco es útil para hacer pronósticos sobre la producción de energía.

Para Guatemala, NREL desarrolló años meteorológicos típicos para La Aurora Guatemala, Huehuetenango, Flores, Puerto Barrios y San José. Los datos están disponibles en formato .csv y un formato estándar en la meteorología llamado TY, que se puede importar en excel con un macro para leerlos (TMYreader.xls).

La figura 18 muestra el comportamiento de la RGH durante dos días seleccionados de la base de datos del año meteorológico típico. (TMY por sus siglas en inglés). También se muestra la radiación global horizontal extraterrestre RGHE, es decir fuera de la atmósfera.

Figura 18: La Aurora, RGH y RGHE, 3 de abril: $RGHE = 10,491 \text{ Wh/m}^2$, $RGH = 7,758 \text{ Wh/m}^2$; 7 de septiembre: $RGHE = 10,365 \text{ Wh/m}^2$, $RGH = 2,630 \text{ Wh/m}^2$.



Fuente: Autor, datos SWERA.

Series temporales de sitios específicos

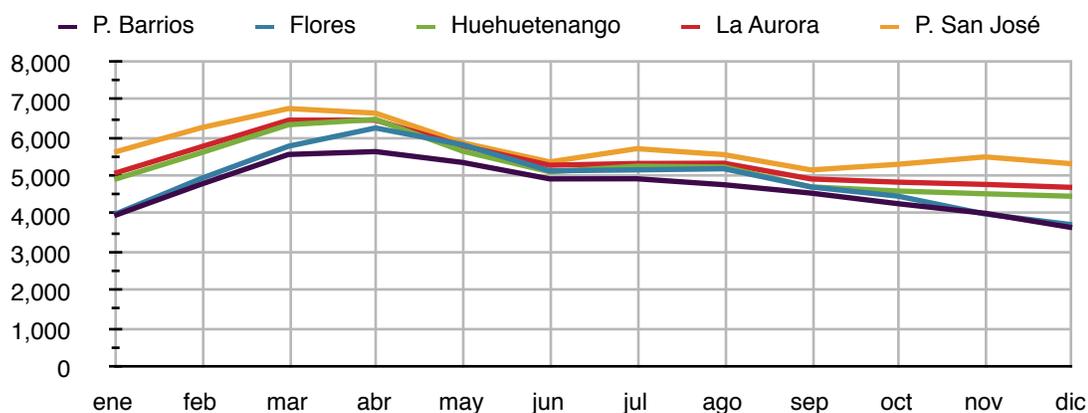
SUNY desarrolló series temporales para La Aurora Guatemala, Huehuetenango y Flores Petén, que pueden utilizarse para simulaciones de sistemas solares. Las series de tiempo incluyen datos horarios de la radiación global, directa y difusa. Éstos archivos están disponibles en formato MS Excel.

3.3 El recurso solar

Aunque Guatemala se encuentra en el cinturón solar (la región entre las latitudes de 30 grados norte y sur) no cuenta con los recursos esperados, porque el clima de la región es bastante nublado, sobre todo en la costa atlántica de la región. Sin embargo, aunque no es tan grande como se podría esperar por la ubicación geográfica, el recurso es amplio y relativamente estable durante el año, lo cual permite diseñar sistemas de conversión de energía solar que funcionen todo el año.

La figura 19 muestra la RGH para cinco sitios según el modelo CSR de NREL. Los meses de mayor y menor recurso varían un poco por región, a causa de las diferencias regionales en cuanto a la duración de la estación de lluvia. Sin embargo, en general se puede decir que el recurso solar es amplio y estable en casi todo el país durante todo el año.

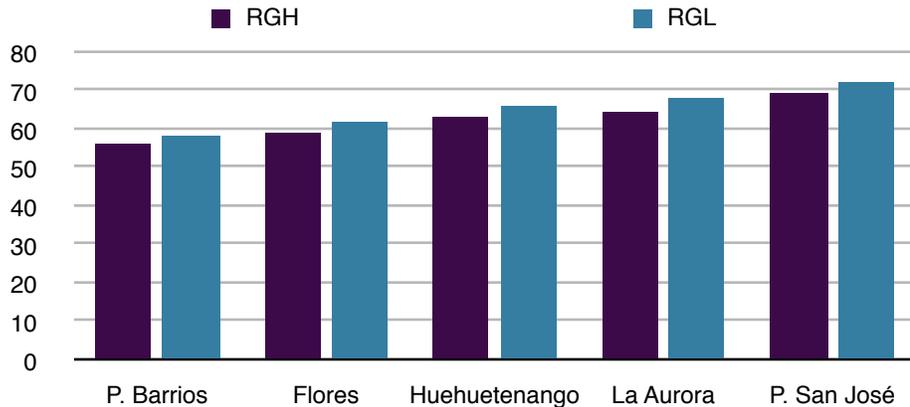
Figura 19: Radiación global horizontal (Wh/m^2 por día).



Fuente: Autor, datos SWERA.

Hay más sol en los meses de marzo y abril, la época que en Guatemala se conoce como verano. El recurso va bajando poco a poco hacia diciembre y enero, lo cual es más marcado en Petén y la Costa Atlántica. Es interesante que a pesar del calor que hace en Petén, el recurso solar en esta región es menor que en el resto del país, incluso en el altiplano. Se hace notar la nubosidad de la región por la selva tropical de Petén y la cercanía del Atlántico.

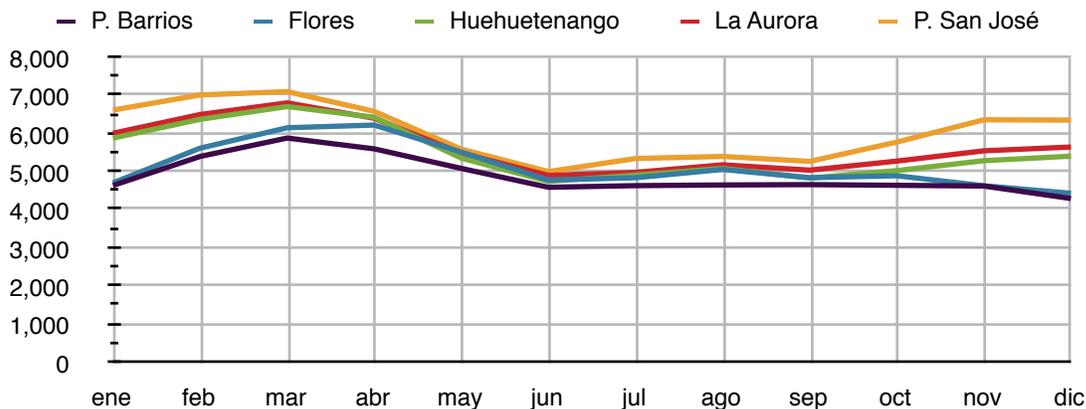
Figura 20: RGH y RGL ($kWh/m^2 \cdot \text{año}$).



Fuente: autor, datos SWERA.

El promedio anual de la RGH varía de entre 4.5 y 5.0 kWh/m^2 por día en Petén y la franja transversal del norte, entre 5.0 y 5.5 kWh/m^2 por día en el altiplano y el oriente del país, hasta entre 5.5 y 6.0 kWh/m^2 por día en la costa sur. Los mapas de NREL y de SUNY coinciden en la mayoría del territorio. Sin embargo, el mapa de NREL parece indicar un recurso un poco mayor. La figura 20 compara el recurso anual de cinco lugares expresado en kWh/m^2 . Aunque existen diferencias mensuales importantes, la diferencia anual entre RGL y RGH resulta ser menos del 5 %.

Figura 21: Radiación sobre una superficie con inclinación igual latitud ($Wh/m^2 \cdot \text{día}$).

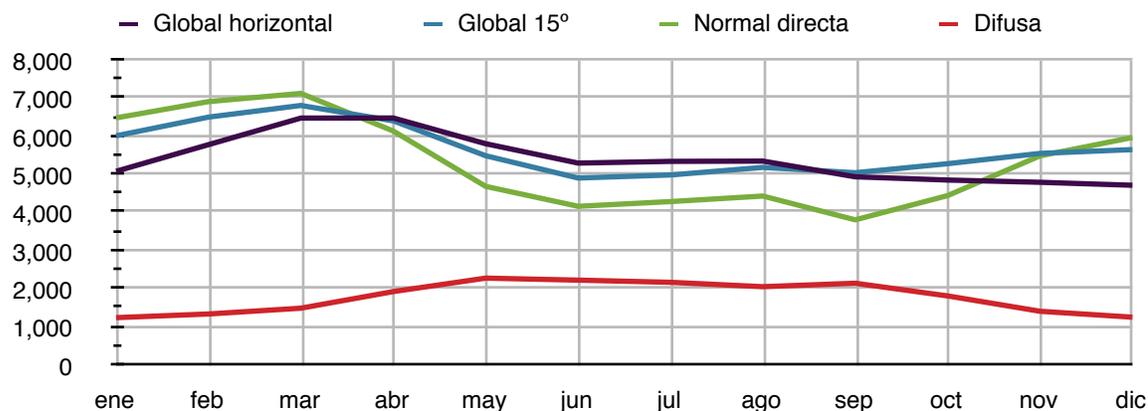


Fuente: Autor, datos SWERA.

La inclinación de la superficie receptora mejora la energía anual con uno por ciento. En la figura 21 se puede notar una mejora significativa en los meses septiembre a enero. Sin embargo, la radiación disminuye un poco durante los meses de mayo a agosto. La inclinación de 15° mejora la captura de energía solar durante los meses más fríos, lo cual puede ser conveniente para aplicaciones solares térmicas.

La figura 22 presenta los componentes de la radiación de La Aurora. Se nota que la radiación difusa aumenta en la época lluviosa.

Figura 22: La radiación solar por mes para La Aurora ($kWh/m^2 \cdot día$).



Fuente: Autor, datos SWERA.

3.4 El potencial solar

Sobre el territorio de Guatemala incide cada año una energía solar de alrededor de 200,000 TWh. La tierra usa esta energía para calentar el ambiente, para el crecimiento de las plantas y la evaporación de agua. Captar el 0.05 % de este recurso sería suficiente para cubrir la demanda total de energía del país.

Este capítulo presenta las tecnologías disponibles para aprovechar el recurso solar en forma de energía térmica y energía eléctrica, las cuales, aparte de los combustibles para el transporte, son las formas de energía mas importantes.

3.4.1 Sistemas solares térmicos

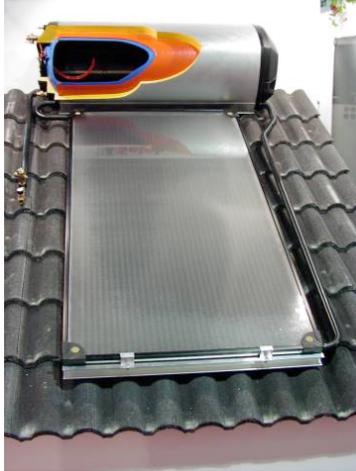
La energía solar térmica tiene muchas aplicaciones y es la que los seres humanos perciben en el entorno natural: el sol calienta la tierra y seca la ropa. Entre las aplicaciones térmicas solares encontramos: secadores solares de vegetales, hornos y estufas solares, aparatos de destilación y de desalinización a través de evaporación de agua, purificación de agua por medio de la radiación UV, calentadores solares de agua de temperatura baja para usos domésticos y de temperatura alta para procesos industriales.

Además, la energía solar es un factor importante en el diseño de edificios en cuanto a niveles de iluminación y el clima interior. Lastimosamente, es un conocimiento que se ha ido perdiendo por la disponibilidad de sistemas de iluminación artificial y equipos de climatización que desconectan el clima interior del exterior.

Las aplicaciones solar térmicas para bajas y medianas temperaturas tienen un potencial energético grande para Guatemala. Las tecnologías de calentamiento de agua, pero también de otros líquidos y de aire, están en su fase de expansión rápida. Sus costos han bajado a un nivel que compite directamente con la calefacción en base de combustibles. Promoción e incentivos para los usuarios pueden acelerar la introducción de esta tecnología.

Una característica del clima de Guatemala es, que durante la época más fría (diciembre, enero), existe un amplio recurso solar. Sobre todo en el altiplano esto se hace notar con temperaturas que bajan a cero grados en la noche y niveles de radiación de entre 5 y 6 kWh/m² por día.

Figura 23: Calentador solar de agua de placa plana.



Fuente: Solahart.

Para usos de temperatura baja (hasta 60 °C) los colectores planos son los mas comunes. El clima de Guatemala permite diseñar sistemas con una alta fracción solar, es decir que solo requieren poca energía adicional para satisfacer la demanda energética del usuario. Para temperaturas altas (hasta 100 °C), como por ejemplo para el uso en procesos industriales, el colector plano pierde mucha de su eficiencia y se puede recurrir a colectores de tubos de vidrio al vacío. La figura 24 muestra un ejemplo de este tipo de tecnología.

Figura 24: Colector de tubos de vidrio al vacío.

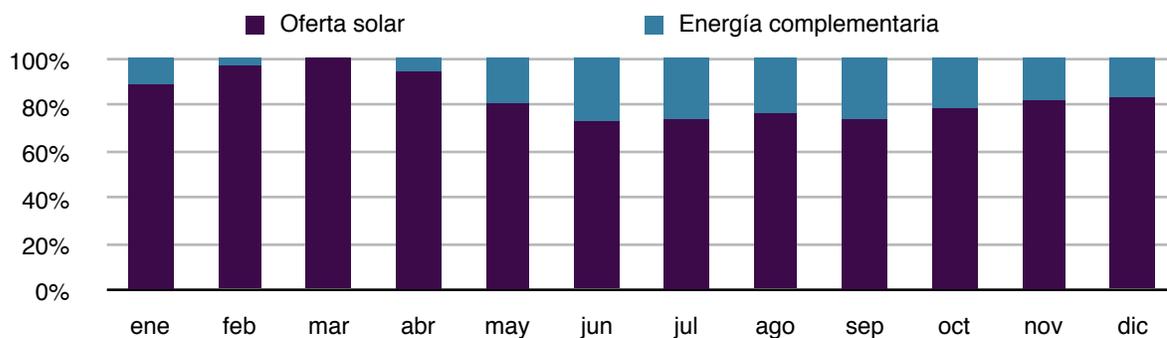


Fuente: Apricus.

En Guatemala los sistemas solares térmicos pueden diseñarse para cubrir casi el 100 % de la demanda térmica. Sin embargo, por lo general los sistemas solares térmicos se dimensionan en base del mes de máxima oferta de energía solar. Por lo contrario, el sistema se sobrecalentaría muchas veces, lo cual requiere de medidas de seguridad y perjudicaría el funcionamiento a largo plazo. La figura 25 muestra un ejemplo de la demanda de un sistema solar basado en la oferta del mes con mayor recurso (marzo). Se supone una demanda constante a través de los meses, lo cual no necesariamente es preciso. La figura muestra la oferta solar por mes y la energía complementaria que se necesita. Resulta que la fracción solar anual es del 83 %, es decir que el usuario debe conseguir el 17 % de la energía anual de otra fuente.

Los calentadores solares de agua tienen un nivel de costo de alrededor de US\$ 1,000³ para una familia de cinco personas y recuperan su inversión dentro de unos años. Dado las condiciones climatológicas de Guatemala, es la tecnología que por el momento tiene la mejor rentabilidad entre las tecnologías de energía renovable. En el anexo se encuentra un estudio de caso de esta tecnología que incluye un análisis económico.

Figura 25: fracción solar por mes, La Aurora.



Fuente: Autor.

No existen datos sobre la demanda de energía térmica para calentamiento de agua. Sin embargo, asumiendo que el 10 % de la población guatemalteca tuviera acceso a esta tecnología, podría desplazarse el consumo de más de 350 GWh por año⁴, es decir un 5 % de la demanda eléctrica nacional.

³ Valor indicativo. No es el objetivo de este informe entrar en detalles de las tecnologías. El rango de productos y precios es amplio.

⁴ Estimado del autor: 7 bañadas por persona por semana, consumo energético de una bañada igual 1 kWh.

El potencial para la energía solar térmica en los sectores del comercio y de la industria es difícil de estimar por la diversidad de aplicaciones en estos sectores. Por otro lado, las calderas en estos sectores por lo general funcionan en base de la combustión de GPL o búnker, lo cual resulta más económico que la calefacción eléctrica que es mas típica para el sector residencial. En el anexo se encuentra un ejemplo de un sistema para un hotel. El cálculo se realizó con el programa de simulación RETSCREEN.

Para levantar aún más el nivel de temperatura o para la generación de vapor, se aplican los colectores de tipo concentrador que usan lentes o reflectores que concentran la radiación directa en un receptor tipo linear (figura 26) o puntual. Estos sistemas tienden a ser más económicos para proyectos a gran escala. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la radiación directa muestra más fluctuación durante el año en las condiciones climatológicas de Guatemala.

Figura 26: Concentrador solar y colector linear.



Fuente: Volker Quaschnig.

3.4.2 Sistemas fotovoltaicos aislados

Los sistemas fotovoltaicos aislados son una buena opción para la electrificación de comunidades, casas, fincas o instalaciones en lugares donde no hay acceso a la red o el costo de la conexión es demasiado alto. El Instituto Nacional de Estadísticas estima que en el año 2002 habían 18,175 sistemas de iluminación fotovoltaica instalados en el país [INE03]. Las aplicaciones básicamente son de iluminación, pero en base de la energía solar también se operan teléfonos comunitarios, telesecundarias (televisores, videograbadoras), puestos de salud (refrigeradoras de vacunas) y bombas de agua y más. La figura 27 muestra una vivienda rural y su panel solar para la iluminación.

También en zonas urbanas puede resultar mas económico instalar un sistema fotovoltaico para energétizar una aplicación, que conectarlo a la red. Ejemplos son los parquímetros en la calle y señales de tránsito en las carreteras.

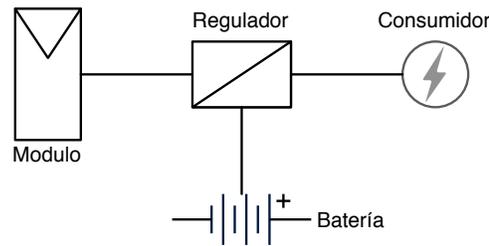
Figura 27: Energía solar para la iluminación de viviendas en el área rural.



Fuente: Fundación Solar.

El siguiente esquema (figura 28) muestra los componentes principales del sistema fotovoltaico. Los sistemas fotovoltaicos (FV) convierten la radiación solar directamente en energía eléctrica a través de un panel o modulo fotovoltaica. Por qué la demanda y la oferta de energía no coinciden, se requiere de algún tipo de acumulador de energía. Los sistemas FV usan una batería de plomo-ácido para almacenar la energía capturada durante el. Un regulador de carga controla el estado de carga de la batería. La pérdida de energía en el ciclo de carga y descarga de la batería (hasta el 75 %), es un inconveniente intrínseco de los sistemas aislados.

Figura 28: Esquema general de un sistema FV aislado.



Fuente: Autor.

El recurso solar es tal que los sistemas FV aislados pueden funcionar durante todo el año en todo el país. Porque en la mayoría de los casos no existe ninguna fuente alterna de energía, se dimensionan en base del caso extremo, es decir la demanda máxima en el mes de menor recurso solar. Considerando el alto costo por capacidad instalada, es importante usar aplicaciones eficientes y bajar la demanda a lo mínimo.

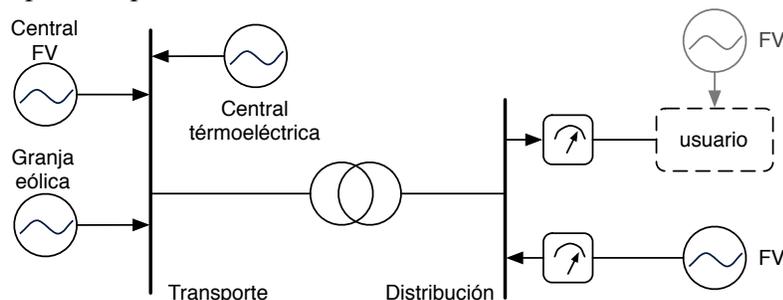
Las pequeñas diferencias locales que se presentan en el recurso solar, se manifiestan en la capacidad instalada, que para una misma aplicación puede variar en un 10 % para diferentes lugares del país. La inversión varía en el mismo rango. Por otro lado, también la temperatura ambiental se refleja en el costo del sistema: la vida útil de las baterías se acorta en ambientes de alta temperatura.

El potencial de sistemas fotovoltaicos aislados no se refiere al potencial energético, sino mas bien al número de sistemas a instalar. Datos del MEM indican que, a pesar del impulso que se está dando a la electrificación rural, más de 200,000 familias no tendrán acceso nunca a la energía eléctrica. Por otro lado, existe un mercado comercial de sistemas FV para fincas y casas rurales que no se puede cuantificar.

3.4.3 Sistemas fotovoltaicos interconectados

Los sistemas fotovoltaicos interconectados son plantas generadoras que producen energía eléctrica para su comercialización. También el autoconsumo, parcial o completo, de la energía es posible. Se puede distinguir entre sistemas centralizadas y sistemas de generación distribuida.

Figura 29: Las opciones para interconectar un sistema FV.



Fuente: Autor.

Los sistemas de generación distribuida se instalan sobre los techos de edificios y tienen una potencia de algunos kW. Pueden instalarse “detrás del contador” o tener su propia acometida y contador. La figura 29 muestra ambas opciones. Las tarifas de compra y venta pueden ser independientes o, de lo contrario, la empresa distribuidora cobra solo la diferencia entre energía entregada y energía recibida.

En El Salvador se inauguró éste año el sistema FV interconectado más grande de la región sobre el techo de la Escuela Alemana en San Salvador. El sistema tiene una potencia de 20 kW y está conectado a la red de la empresa distribuidora Del Sur a través de 6 inversores en una acometida trifásica. La mayor parte de la energía generada es para el autoconsumo en la escuela. Un sólo contador registra compra y venta de energía aunque por el momento no existe ningún contrato sobre el precio de venta de la energía solar. Figura 30 muestra el tablero para informar el público sobre el desempeño del sistema.

Figura 30: Proyecto piloto Escuela Alemana, El Salvador.



Fuente: Autor.

Los sistemas de escala grande se operan como plantas de energía eléctrica con una potencia de unos cientos de kW hasta unos MW. Un sistema de 1 MW requiere una superficie de alrededor de 6,000 m². Los paneles pueden utilizarse como elementos decorativos o constructivos, por ejemplo para techados, agregando un valor extra. La figura 31 muestra un sistema de 189 kW integrado en el techo de una estación de trenes. El sistema tiene una superficie de 1,870 m² y genera alrededor de 160.000 kWh por año. 172 inversores acondicionan la energía para la entrega a la red.

La energía fotovoltaica todavía no puede competir con la energía generada en base de hidrocarburos. Sistemas de este tipo todavía tienen un costo de alrededor de US\$ 10,000 por kilovatio y sólo son económicamente factibles si se incentiva la venta de energía solar. Por otro lado, hay otras fuentes renovables como la hidroeléctrica y las granjas eólicas que producen energía a un costo mucho mas bajo que la energía fotovoltaica.

No obstante, en países industrializados se están realizando proyectos fotovoltaicos de escala grandes, teniendo recursos solares mucho menores que Guatemala. En Alemania las empresas distribuidoras compran la energía solar a una tarifa establecida por ley de alrededor de US\$ 0.50 por kWh. En éste caso el sistema solar casi siempre tiene una acometida separada.

Para Guatemala el potencial técnico es muy grande gracias al amplio recurso solar. La superficie de los techos daría abasto para la instalación de sistemas FV que en conjunto generarían toda la demanda eléctrica del país. Sin embargo, por el alto costo no es la opción más adecuada para el país.

Figura 31: Sistema FV integrado en un edificio.



Fuente: www.solarintegration.de.

3.4.4 Sistemas solares termodinámicos

Los sistemas de energía solar termoeléctrica convierten la energía solar en energía eléctrica mediante un proceso termodinámico, como el ciclo de vapor (Rankin) y el motor Sterling. En California, Estados Unidos, plantas comerciales con una potencia total de 350 MW han estado generando energía eléctrica desde los años 80. También en Andalucía, España, están funcionando pequeñas plantas pilotos. La figura 32 muestra un sistema de 10 kW. Aunque muy económicos no han logrado competir con la tecnología fotovoltaica porque solo funcionan en lugares con altos niveles de radiación directa. Las investigaciones se enfocan en el desarrollo de concentradores mas baratos. Estos sistemas facilitan la integración de un respaldo en base de combustibles para días nublados.

Otro tipo de central termoeléctrica usa el efecto del viento térmico que se genera en un invernadero de escala grande. El aire que se calienta en el invernadero sube por una chimenea alta que se encuentra en el centro del invernadero. En la base de la chimenea se encuentran una serie de aerogeneradores. La tecnología se ha comprobado con plantas pilotos de 50 kW. Existen estudios de factibilidad para diseños de plantas de una escala de unos 100 MW que podrían generar energía a gran escala en áreas desiertas.

Por otro lado, es posible utilizar el calor solar en sistemas de enfriamiento por absorción. Estos sistemas primordialmente tienen aplicación en grandes sistemas de aire acondicionado.

El potencial para las plantas solares termoeléctricas en Guatemala es limitado por la época lluviosa. Sin embargo, habría que investigar hasta que grado el país puede aprovechar la radiación directa en sistemas solares térmicos y termoeléctricos. Existen lugares en la costa sur y el altiplano que tienen una radiación directa normal de mas de 6 kWh/m² por día durante una época de seis meses.

Figura 32: Central solar termoeléctrica.



Fuente: Volker Quaschnig.

3.4.5 Otros sistemas solares

El uso de la luz para iluminación parece algo demasiado obvio. Sin embargo, el clima interno de muchos edificios se regula con equipos de iluminación artificial y aire acondicionado. El diseño en base de arquitectura solar minimiza el uso de energía eléctrica, aprovechando el recurso solar.

Por otro lado, es pertinente mencionar que la luz solar puede aprovecharse en aplicaciones fotoquímicas, por ejemplo para la esterilización de agua. Bajo ciertas condiciones, la luz UV mata eficientemente a los microbios en el agua. Otra aplicación es la descomposición de sustancias tóxicas.

Los secadores solares contribuyen a bajar el uso de combustibles y leña para el secado de verduras, frutas y granos en el área rural. Con estos sistemas sencillos y económicos los agricultores rurales pueden agregar valor a sus productos. También los productores grandes pueden mejorar su eficiencia energética usando secadores solares industriales.

En zonas con suficiente radiación directa existe un potencial para la cocción solar. La figura 33 muestra una estufa solar construida por estudiantes de la CUNOC en Quetzaltenango.

La energía solar puede ser una fuente de energía y un insumo importante para mejorar las condiciones de vida de la gente en el área rural. El potencial de las llamadas tecnologías solares apropiadas todavía no se ha explorado mucho y su aplicación es muy fragmentaria.

Figura 33: Estufa solar.



Fuente: Autor.

4 LA ENERGÍA EÓLICA

4.1 Características de la energía eólica

El viento es un flujo de aire que se caracteriza por su velocidad v (m/s) y su orientación. Una característica importante del viento es que su potencia P (W) es proporcional a la tercera potencia de su velocidad, es decir que la potencia es muy sensible a la velocidad del viento: si la velocidad aumenta un 10 %, la potencia aumenta un 30 %. Por ello, para hacer cálculos de producción de energía de un aerogenerador, es importante disponer de datos precisos de la velocidad del viento. La potencia del viento depende además de forma lineal de la densidad ρ (kg/m³) del aire. Mientras más denso el aire, más grande la densidad de potencia.

Para fines de cálculos, se usa la magnitud de densidad de potencia (W/m²). Para obtener la potencia del aerogenerador se multiplica con la superficie A (m²) del rotor.

$$P = A \times \rho \times v^3$$

Otra característica del viento es que fluctúa bastante de un sitio a otro, de un mes a otro y también durante el día. La velocidad del viento depende del clima de la región, la topografía local y la altura sobre el nivel del suelo. La topografía incluye factores como el tipo de terreno (la rugosidad), obstáculos resguardantes, y variaciones de elevación.

El recurso eólico se mide con un anemómetro (figura 34). Las mediciones para la proyección de granjas eólicas se realizan en alturas de entre 30 y 50 metros. La medición simultánea en dos alturas permite estimar el perfil vertical del viento. Se capturan series de datos de varios meses, incluso hasta años, del promedio de la velocidad durante ciertos intervalos, por ejemplo cinco minutos. Si los intervalos son largos, se pierde el detalle de las fluctuaciones del viento, si en cambio los intervalos son muy cortos, se acumulan tantos datos que el manejo se vuelve más trabajoso y costoso de lo necesario.

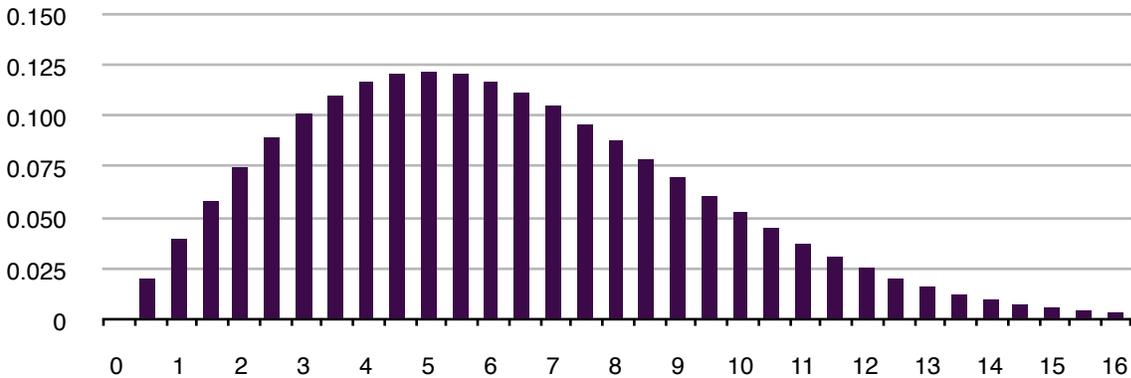
Figura 34: Anemómetro.



Fuente: Volker Quaschnig.

El recurso eólico se presenta a través de una gráfica que indica para ciertos rangos de velocidad, la frecuencia con la cual el viento sopla con una velocidad dentro de estos rangos. La curva de esta figura se puede describir con la llamada distribución de Weibull, un modelo estadístico que permite caracterizar el viento por un factor de escala A y un factor de forma k.

Figura 35: Distribución Weibull, $A=7$, $k = 2$.



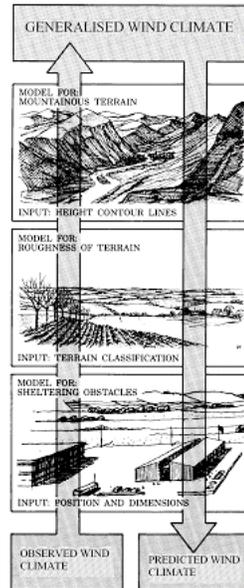
Fuente: Autor.

En ciertos tipos de terreno como por ejemplo áreas montañosas, pueden existir micro climas que influyen sobre el recurso eólico. La variación de la velocidad con la altura sobre el nivel del suelo depende de la rugosidad del terreno. Mientras mas alta es la rugosidad, mas fricción percibe el viento y mas grandes serán las diferencias de velocidad para distintas alturas.

Para hacer un pronóstico del recurso para un sitio específico, hay que tomar en cuenta los obstáculos que pueden disminuir la velocidad del viento. Existen formulas empíricas y reglas de tres para calcular los efectos de obstáculos. Más avanzados son los programas de computación que simulan el flujo de aire en base de datos topográficos.

La metodología de WASP, un programa de cómputo muy común para cálculos de sitios específicos, calcula el viento regional en base de datos del viento y las condiciones topográficas de otros sitios conocidos, llamados sitios de referencia. Una vez estimado el viento regional usa los mismos modelos para estimar el viento en el sitio seleccionado. Es decir que WASP usa datos de los sitios de referencia para estimar el viento en lugares donde solo existen muy pocos datos del viento. El modelo asume que el clima regional es igual en el sitio seleccionado y los sitios de referencia. El estimado resulta mejor si existe una buena correlación entre los datos disponibles del sitio seleccionado y los datos de los sitios de referencia.

Figura 36: Metodología.



Fuente: www.wasp.dk.

El atlas del recurso eólico de Oaxaca describe las características teóricas del viento, cómo se elabora un mapa del recurso y qué datos se usa para ello. Otra referencia es el atlas eólico europeo.

[Explicar Wind Class](#)

4.2 El mapa eólico del proyecto SWERA

El proyecto SWERA generó un mapa con una resolución de 1 por 1 km del recurso eólico de Guatemala con el fin de acelerar la identificación e implementación de proyectos eólicos de escala grande. El mapa no fue diseñado para el cálculo de sitios específicos.

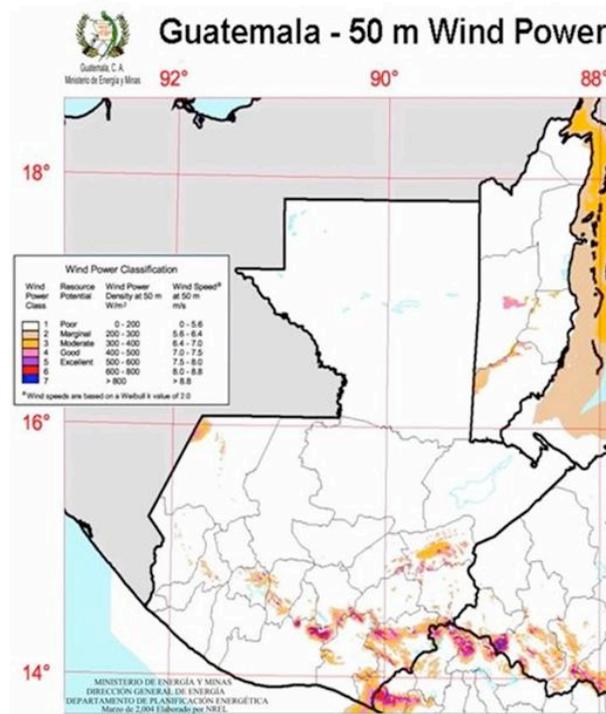
Los productos en cuanto al recurso eólico de Guatemala consisten de mapas y conjuntos de datos de la potencia promedio anual de viento, de la elevación y el relieve, el porcentaje de cobertura de árboles y la ubicación de sitios de medición. Por otro lado, incluye datos de mediciones terrestres: inventario y documentación, resúmenes de los datos procesados. También incluye la documentación de la metodología, la evaluación y las técnicas de validación. Además, NREL ofrece revisar el atlas eólico de la región.

La metodología de NREL combina métodos analíticos, numéricos y empíricos. Los datos luego se proyectan sobre un mapa usando un sistema de información geográfica (SIG). La metodología no depende de observaciones terrestres de alta calidad, aunque su disponibilidad obviamente mejora el resultado. Produce mapas de alta resolución (1 por 1 km o mejor).

Con el modelo MASS⁵ se simularon condiciones climatológicas globales y se calculó su efecto en el viento local con el modelo de flujo eólico WindMap, usando datos topográficos y de rugosidad de la tierra. MASS produce una serie de datos de 365 días sobre una rejilla de 2.5 por 2.5 km, WindMap sobre una rejilla de 1 por 1 km. Los resultados del modelo fueron revisados por NREL y mejorados a través de datos empíricos y métodos analíticos.

Los datos principales que se usaron para MASS son del NCEP/NCAR reanalizados de viento en la regiones altas del aire. Otros datos que se usaron: datos del viento de estaciones meteorológicas superficiales (NCDC DATSAV), datos del viento de estaciones meteorológicas de los estratos altos de la atmósfera, datos satelitales de viento sobre el océano, mediciones locales.

Figura 37: Mapa eólico de Guatemala.



Fuente: SWERA.

4.3 El recurso eólico

El recurso eólico de Guatemala es muy puntual, tanto en el sentido de la distribución espacial como en el tiempo. Los vientos aprovechables de Guatemala se encuentran en los valles de la costa sur, la zona de la bocacosta.

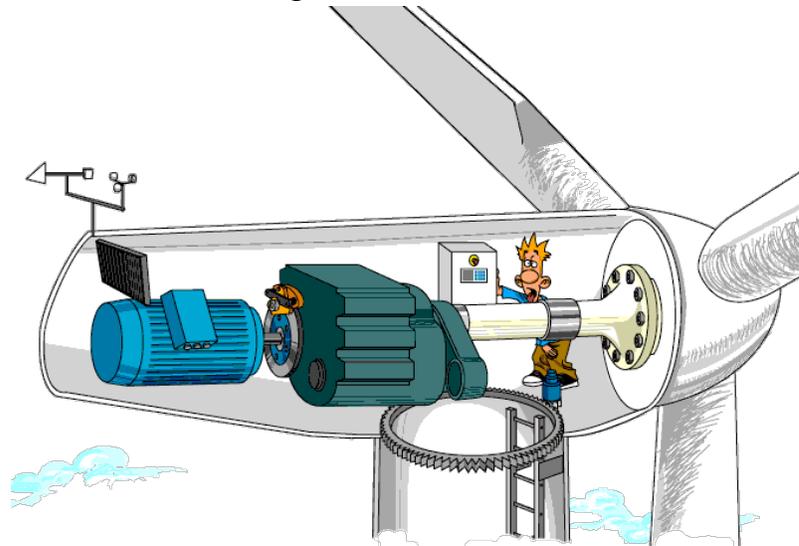
⁵ MASS =

4.4 El potencial eólico

4.4.1 Sistemas aeroeléctricos interconectados

Los convertidores de energía eólica o aerogeneradores convierten la energía del viento en energía eléctrica a través de un sistema electromecánico que básicamente consiste de un rotor, una transmisión y un generador eléctrico. Las aspas del rotor convierten el movimiento del aire en una rotación del eje principal. La transmisión multiplica las revoluciones del eje secundario porque el generador funciona con 30 o 60 revoluciones por segundo. Un mecanismo de seguimiento hace que el eje principal siempre esté alineado con el viento. El aerogenerador funciona completamente autónomo.

Figura 38: Funcionamiento del aerogenerador.



Fuente: www.windpower.dk.

Los aerogeneradores pueden funcionar en sistemas aislados en áreas remotas o interconectados en una granja eólica para la producción a gran escala de energía eléctrica.

Según el mapa del recurso eólico, Guatemala cuenta con una superficie de 1,568 km² donde el recurso es de clase 4 o mejor. Asumiendo una densidad superficial de generación de 5 MW/km², la capacidad potencial es de 7,840 MW que podría generar energía eléctrica en la orden de magnitud de 20,000 GWh por año. Tomando en cuenta las regiones con un recurso de clase 3, el cual hoy día también se puede explotar, el potencial es mucho mas grande. La superficie de éstas regiones puede contribuir un máximo de 17,200 MW y generar energía eléctrica de alrededor de 35,000 GWh por año.

Las regiones con más potencial (como por ejemplo Palín) se encuentran cerca de centros de demanda y líneas eléctricas. Sin embargo, uno de los primeros pasos en el desarrollo de un proyecto de energía eléctrica en general, es analizar la capacidad (potencia de corto circuito) en las sub-estaciones más cercanas. Si no hay sub-estación cerca, el proyecto debe asumir los costo para la construcción de una.

El clima de Guatemala se caracteriza por dos estaciones, la lluviosa y la seca. De manera parecida, la época ventosa es bastante marcada. Los recursos eólicos se concentran en los cuatro meses de diciembre a marzo. Aunque el viento tiende a revivir en julio y agosto, alrededor de la energía anual se cosecha de diciembre a marzo. El viento sopla durante la noche, gana fuerza en la mañana y disminuye poco a poco durante la tarde para subir otra vez entrando la noche.

El recurso eólico no coincide con las zonas que se caracterizan por una baja tasa de electrificación.

Figura 39: Granja eólica.



Fuente: Volker Quaschnig.

4.4.2 Sistemas eólicos aislados

La energía del viento se puede usar para realizar trabajo mecánico como moler granos o bombear agua. Los sistemas directos son completamente mecánicos y tienen la ventaja de que se trata de tecnología sencilla que cualquier mecánico puede mantener. Los convertidores para estas aplicaciones normalmente funcionan con tres o más aspas anchas, que les permiten generar un momento alto con bajas revoluciones, lo cual es necesario para aplicaciones como el bombeo y el molino. En Nicaragua este tipo de convertidor ha tenido éxito con bombas de mecate.

Figura 40: Bombeo de mecate.



Fuente: www.ropepumps.org.

Aunque los equipos mecánicos son económicos y sencillos, los equipos electromecánicos están ganando terreno. Este tipo de sistema genera energía eléctrica usando un aerogenerador que luego se usa, por ejemplo, en una bomba eléctrica. Los sistemas electromecánicos requieren menos mantenimiento, pero la ventaja principal es que se desconecta, hasta cierto límite, el lugar de bombeo del lugar del convertidor de energía renovable. El aerogenerador puede estar en la cima de una colina donde sopla el viento, mientras la bomba esté más abajo a la orilla del río. La desventaja de este desarrollo es que su aplicación requiere más conocimientos especializados y la inversión es mayor.

El mapa eólico fue diseñado para identificar el potencial de granjas eólicas para la producción de energía a gran escala. Como el mapa solo indica zonas con una densidad de potencia anual promedio de más de 200 W/m^2 a 50 metros sobre el nivel del suelo, no es de gran ayuda para el análisis de sistemas eólicos o híbridos aislados en el interior del país. Por ejemplo, para bombeo sería interesante conocer el recurso eólico durante la época seca. Tomando en cuenta que el clima de Guatemala tiene vientos más fuertes en esta época, valdría la pena investigar más en detalle el recurso eólico para aplicaciones específicas.

4.4.3 Sistemas híbridos

Los sistemas híbridos incorporan dos o más fuentes de energía incluyendo la energía solar, la energía eólica y los combustibles. En algunas regiones existen recursos complementarios que se pueden aprovechar en un solo sistema. En el punto óptimo, el costo del sistema será más bajo. Típicamente se trata de sistemas aislados.

Por ejemplo, un sistema diesel-eólico puede resultar más económico que una planta diesel y al mismo tiempo tener una disponibilidad mejor que el aerogenerador. Hay que tomar en cuenta que los sistemas híbridos son más complicados, involucran más componentes y conocimiento técnico. También el dimensionamiento es más difícil.

La viabilidad de los sistemas solar-diesel, solar-eólico o solar-eólico-diesel depende mucho de las condiciones locales y la demanda de energía. En el anexo se encuentra un ejemplo del diseño de un sistema híbrido para una estación de investigación en Puerto Barrios. El cálculo se realizó con el programa de simulación HOMER.

5 DESAFÍOS PARA EL DESARROLLO DE LAS FUENTES RENOVABLES EN GUATEMALA

Hoy día, las tecnologías de las energías renovables son confiables y cada vez más competitivas. La energía eólica y la energía solar térmica han logrado poder competir económicamente con la energía en base de hidrocarburos. Sin embargo, existen otras barreras que dificultan la introducción masiva de la energía renovable. Son de tipo político, institucional, legislativo y de información.

La barrera más grande tal vez sea que la energía renovable tiene que competir con las energías hidrocarbúrica y nuclear, que han sido promovidas y subsidiadas sistemáticamente durante décadas. Se han creado estructuras (legislativas y físicas) para la conversión centralizada de energía en las cuales para las fuentes naturales de energía, por su carácter esparcido, es difícil conquistarse un espacio.

Para los países en vías de desarrollo que tienen una tasa alta de crecimiento poblacional y económico, y por consecuencia, un crecimiento alto de la demanda energética, el sector de energía es de suma importancia. Las energías renovables podrían cubrir una parte importante de la demanda. Sin embargo, por el rápido crecimiento, muchas veces se opta por respuestas a corto plazo. La implementación de sistemas que usan fuentes renovables requiere más tiempo, recursos y conocimientos específicos.

Aunque las estructuras existentes no permiten un cambio rápido, existe consenso en el mundo de que la transformación del sector energético hacia las fuentes renovables es necesario e inevitable: el alza de energía, la dependencia de la importación de petróleo, los conflictos geopolíticos, la contaminación local que provoca la combustión, el cambio climático global y sus impactos locales son razones por las cuales hay que promover el cambio hacia las fuentes renovables de energía. En países con un bajo índice de cobertura eléctrica, las fuentes renovables de energía pueden contribuir a la electrificación de zonas rurales de difícil acceso.

Por otro lado, la energía renovable constituye más que solamente una fuente de energía. En países industriales que sirven como ejemplo para la utilización de la energía renovable, como Japón, España y Alemania, se ha entendido que la energía renovable puede desencadenar una dinámica económica para el país, la cual agrega valor y crea empleo local desde la planificación y implementación de los proyectos y la fabricación de componentes, hasta la operación y el mantenimiento de las instalaciones. La industria de esos países ya está exportando sus tecnologías.

El interés de parte de inversionistas privados, sea como generador de energía o como emprendedor que ofrece productos y servicios, puede acelerar la introducción de la energía renovable. El sub-sector de las energías renovables es una industria relativamente joven que ofrece muchas oportunidades para el desarrollo de empresas nuevas. Sin embargo, para que el inversionista se interese por la energía renovable, se necesitan una visión política sobre la importancia de los renovables para el país, marcos institucionales adecuados, incentivos económicos atractivos, investigación y promoción.

5.1 Programas y proyectos actuales

5.1.1 PPP

El objetivo de la iniciativa energética mesoamericana del Plan Puebla Panamá es promover el desarrollo económico y social de los pueblos de Mesoamérica, propiciando una mayor y mejor cobertura del servicio eléctrico y la conformación de mercados eléctricos mesoamericanos para atraer la participación del sector privado, particularmente en el financiamiento de nuevos proyectos de generación que demanda el desarrollo económico de la región, a fin de reducir el costo de la electricidad para los usuarios finales y mejorar la competitividad de las empresas.

El Proyecto SIEPAC (Sistema de Interconexión Eléctrica de los Países de América Central) consiste en la creación y puesta en marcha de un mercado eléctrico centroamericano mayorista, y del desarrollo del primer sistema de transmisión regional en donde, cualquier agente calificado podrá comprar o vender electricidad, independientemente de su ubicación geográfica.

La iniciativa persigue promover el uso eficiente de los recursos naturales de la región, particularmente para el beneficio de las comunidades rurales que actualmente no cuentan con servicio eléctrico. Para ello, se propone las siguientes acciones:

- Definir una estrategia regional de mediano y largo plazo de promoción de las energías renovables.
- Promover la planificación indicativa regional con metas específicas en el uso de la energía renovable y uso de los biocombustibles.
- Detectar una cartera de proyectos susceptibles de desarrollo en los países por los gobiernos, el sector privado o comunidades.
- Definir esquemas de incentivos regulatorios y económicos para la energía renovable.
- Conformar centros de información sobre energía renovables.
- Definir fondos regionales o nacionales para financiamiento de proyectos.

5.1.2 TLC

Es probable que la entrada en vigencia del tratado la libre comercio con Estados Unidos provoca un aumento de la demanda energética por el crecimiento de la actividad económica nacional.

5.1.3 GVEP

La asociación mundial de energía comunitaria (GVEP por sus siglas en inglés) es un programa ambicioso iniciado en 2000 que pretende llevar servicios energéticos modernos a 300 millones de personas en comunidades rurales en todo el mundo que ahora no tienen acceso a energía. Cuenta con el apoyo de muchas instituciones, organizadas alrededor de Banco Mundial.

En el marco de GVEP, Guatemala ha elaborado un análisis de las necesidades energéticas de la franja transversal del norte. Luego se desarrolló un plan de inversión para la región invirtiendo US\$ xxx millones en sistemas solares para iluminación, bombeo de agua, telecomunicaciones, telesecundarias y otros servicios.

5.2 Barreras para las energía renovables

El Banco Interamericano de Desarrollo, BID, concluye que además de la hidroelectricidad y de la energía geotérmica no existen por el momento fuentes renovables, en escala significativa, que puedan ser competitivas en la región. Las fuentes renovables en pequeña escala son competitivas únicamente en ciertos nicho. Con la desregulación de los mercados, los planes integrados de recursos de los gobiernos han perdido pertinencia y que hay que buscar estrategias nuevas para promover las fuentes renovables [BID98, p.30].

La Comisión Económica para América Latina de las Naciones Unidas, CEPAL, propone componentes para una estrategia para el fomento de los recursos renovables y destaca la necesidad de una alianza de los sectores público y privado que posibilite la participación pública-privada en la gestión, promoción y ejecución de programas y proyectos con energías renovables [CEPAL04-1, p.65].

5.2.1 Barreras financieras-económicas

Es necesario diferenciar entre sistemas aislados y sistemas interconectados.

Para sistemas aislados o pequeñas aplicaciones de energía solar o eólica, el financiamiento puede ser una barrera importante. En el caso de los calentadores solares de agua, el costo inicial del equipo es mucho más alto que el costo inicial de un calentador eléctrico. Y, aunque se recupera dentro de unos años por el ahorro de energía, muchas familias no tienen el efectivo disponible para hacer la inversión en un calentador solar.

Algo parecido ocurre con los sistemas fotovoltaicos para iluminación en el área rural. A largo plazo, un sistema FV es más económico incluso en comparación con el uso de velas o combustibles para la iluminación y pilas para el radio. Sin embargo, la gente no tiene dinero para comprar un sistema solar.

A veces los proveedores de equipo dan alguna forma de crédito. Sin embargo, muchas pequeñas aplicaciones tendrían más alcance, si los usuarios tuvieran acceso a pequeños créditos blandos.

Para los proyectos de sistemas solares y eólicos interconectados existe una barrera económica: no son rentables dentro del marco del mercado eléctrico. Para que las energías renovables puedan competir, habrá que cambiar las reglas del mercado u ofrecer otro tipo de incentivo financiero.

La ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable ofrece algunos incentivos fiscales a los proyectos, pero no garantiza la estabilidad económica a largo plazo que necesitan los proyectos de energía renovable por las altas inversiones que requieren. En países exitosos en el campo de las energías renovables, existen tarifas garantizadas para la venta de la energía de proyectos de energía renovable.

El subsidio a la energía eléctrica puede verse como una barrera porque distorsiona el precio de esta comodidad y la percepción del costo de las energías renovables.

5.2.2 Barreras institucionales

El desarrollo de los recursos renovables requiere un fuerte liderazgo del gobierno porque representa una fuerte inversión para un beneficio en el futuro. Una visión clara es imprescindible para vender la idea. Esto requerirá un fuerte trabajo de cabildeo.

En Guatemala todavía no existe una estrategia para el desarrollo de las energías renovables. Los escenarios se basan en 'business as usual'. Herramientas como LEAP⁶ podrían ayudar para desarrollar escenarios energéticos alternos en el contexto socio-económico del país. En base del escenario deseado hay que tomar las decisiones necesarias.

El ministerio competente no solo debe ser un promotor de la energía renovable, sino también un tomador de decisiones en base de metas explícitas.

Podría existir un conflicto de competencia entre el Ministerio de Energía y Minas (MEM) y el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales el cual es la entidad designada para proyectos MDL.

En las instituciones académicas hay poca actividad en el campo de las renovables. No hay noción de que las energías renovables, con el amplio recurso que existe en Guatemala, pueda ser un tema interesante para desarrollar.

5.2.3 Barreras de información

Para consumidores finales y usuarios de sistemas de energía renovable hace falta información y promoción.

Es necesario fortalecer el conocimiento de las energías renovables y la importancia para el país de las personas, instituciones y empresas involucradas en el sector energético.

⁶ Planificación de Alternativas Energéticas a Largo plazo (LEAP por sus siglas en inglés)

5.2.4 Barreras sociales

En Guatemala se dan a menudo casos de vecinos que bloquean proyectos infraestructurales cerca de sus comunidades, muchas veces como resultado de falta de información o por desinformación. Para realizar un proyecto exitosamente, es necesario involucrar a las comunidades desde el inicio de los proyectos. En el caso de desarrollo de proyectos de escala mediana y grande, el proceso de consulta y participación de las comunidades afectadas debe convertirse en un elemento obligatorio.

5.3 Tecnologías más prometedoras

Calentamiento de agua domiciliar, tanto como para procesos industriales.

Solar FV para electrificación rural e investigación de sistemas híbridos.

Aplicaciones de tecnología solar apropiada como el tratamiento de agua y secado solar.

Granjas eólicas.

5.4 Prioridades solares

Solar térmico

- Promoción de calentadores solares
- Investigación y estimulación de la industria, formación de profesionales en el campo
- Incentivos y acceso a (micro) crédito

5.5 Prioridades viento

Granjas eólicas

- Verificación del mapa eólico
- Adecuar el marco regulatoria
- Negociar un 'precio justo' para la energía
- Análisis de la capacidad de la red en lugares de mayor potencial eólico

GLOSARIO Y ACRÓNIMOS

AMM	Administrador del Mercado Mayorista
Bep	Barriles equivalentes de petróleo
Brillo solar	Ver Irradiancia
Capacidad	Ver Potencia
CIPER	Centro de Información y Promoción de la Energía Renovable
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
DGE	Dirección General de Energía
Energía	La capacidad de hacer un trabajo. En términos eléctricos es común expresar la energía en Wh, que representa la actuación de una potencia de un vatio durante una hora.
Energía renovable	Las fuentes de energía que no se agotan al usarlas.
Factor de planta	
GW	Gigavatio = 1,000 MW
Irradiancia	Densidad superficial del flujo energético solar (W/m ²)
Irradiación	Ver Radiación
Insolación	Ver Radiación
kW	Kilovatio = 1,000 W
MEM	Ministerio de Energía y Minas
MW	Megavatio = 1,000 kW
NREL	National Renewable Energy Laboratorio
Potencia firme	La máxima potencia que un generador puede ofrecer en el mercado en virtud de contratos.
Potencia nominal	La potencia para la cual un aparato fue diseñado, para diferenciar de la potencia máxima que puede ser más alta.
Radiación	Densidad superficial de la energía solar (Wh/m ²)
Radiancia	Ver Irradiancia
RDN	Radiación directa normal
RGH	Radiación global horizontal
SUNY	State University of New York
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
TW	Teravatio = 1,000 GW
W	Vatio, unidad de potencia
Wh	Vatiora, unidad de energía

BIBLIOGRAFÍA

[OLADE04] Energía en cifras, SIEE OLADE, 2004.

[OLADE05] Balance energético de Guatemala 2004, SIEE OLADE, 2005.

[DGE03] Plan indicativo, 2003.

[RED99] Dissemination of the nicaraguan rope windpump technology to Latin American countries final report on evaluation & transfer, J.A. de Jongh, R.P.P. Rijs, RED Renewable Energy Development vof Eindhoven, The Netherlands June 1999.

[INE03] Características de la población y de los locales de habitación censados, INE, julio 2003.

[BM02] Evaluación de programas de estufas mejoradas en Guatemala, Banco Mundial, Fundación Solar, 2002.

[BID98] Elementos estratégicos para el sector energía en América Latina y el Caribe, Banco Interamericano de Desarrollo, 1998.

[BUNCA02-1] Manuales de energía renovable, Solar fotovoltaica, Biomass Users Network Central America BUN-CA, 2002.

[BUNCA02-2] Manuales de energía renovable, Solar térmica, Biomass Users Network Central America BUN-CA, 2002.

[BUNCA02-3] Manuales de energía renovable, Eólica, Biomass Users Network Central America BUN-CA, 2002.

[CEPAL04-1] Fuentes renovables de energía en América Latina y el Caribe. Situación y propuesta de políticas, Comisión Económica para América Latina, mayo de 2004.

[CEPAL04-2] Estrategia para el fomento de las fuentes renovables de energía en América central, Comisión Económica para América Latina , agosto de 2004.

[] Ley de electricidad

[] Reglamento

[] Ley de incentiva

[] Reglamento

[AMM03] Informe estadístico mercado mayorsita electricidad de Guatemala 2003, AMM.

[AMM04] Informe estadístico mercado mayorsita electricidad de Guatemala 2004, AMM.

[NREL04-1] Atlas de recursos eólicos del estado de Oaxaca, NREL, abril de 2004.

[] Atlas eólico europeo

[Elliott04] Dennis Elliott, NREL, Wind Resource Mapping for Central America and Cuba, presentation for the Antigua Meeting SWERA – PPP, November 2-6, 2004.

[Renné04-1] Dave Renné, NREL, Overview of the United Nations Environment Programme's Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) Project, presentation for the Antigua Meeting SWERA – PPP, November 2-6, 2004.

[Renné04-2] Dave Renné, NREL, SWERA Solar Resource Assessment in Central America: Overview and NREL Contributions, presentation for the Antigua Meeting SWERA – PPP, November 2-6, 2004.

[Pérez04] Richard Pérez, University Albany, High-Resolution Solar Resource Mapping for Central America and Cuba under the UNEP SWERA Project, presentation for the Antigua Meeting SWERA – PPP, November 2-6, 2004.

[Peus02] Dr. Felix A. Peuser, Solar Thermal Systems, Successful planning and construction, Solarpraxis Berlin, 2002.

[Coll98] Diccionario enciclopédico de términos técnicos, Javier L. Collazo, McGraw-Hill, 1998.

[IIA04] Perfil ambiental de Guatemala, Informe sobre el estado del ambiente y bases para su evaluación sistemática, Instituto de incidencia ambiental, Universidad Rafael Landívar, Guatemala, 2004.

Otras publicaciones de interés:

Gerd Eisenbeiß, DLR, Solarthermie – Wärme und Kraft von der Sonne, FVS + DGS Themen 2000.

Información en el Internet:

www.mem.gob.gt

www.amm.org.gt

www.olade.org

www.eclac.cl

www.bun-ca.org

www.crest.gob

www.windpower.dk

ANEXOS

I. Análisis de un sistema solar térmico utilizando RETScreen

RETScreen es un modelo de cómputo en base de hojas de cálculo Excel para el análisis económico de sistemas de energía renovable. Existen módulos para sistemas eólicos, fotovoltaicos, solares térmicos y otros. El programa fue desarrollado por el Centro de Tecnología Energética en Canada y está disponible sin costo en la página de internet: www.retscreen.net

Se realizó un análisis sencillo en base de datos fictivos de un hotel. El cálculo requiere pocos datos de parte del usuario; básicamente son datos sobre el recurso solar, la demanda de energía y los costos de equipo. Solo los datos en cajillas azules y amarillas se necesitan para cálculo.

La figura I.1, por ejemplo, muestra los datos solares y la demanda del sistema. En éste caso se tomaron los datos del recurso solar y la temperatura ambiental de La Aurora. La demanda de agua caliente se base en un hotel de 15 habitaciones con una ocupación promedio del 50 % y un consumo de agua caliente (60°C) diaria de 400 litros. El programa calcula la temperatura de agua fresca en base de la temperatura ambiental.

RETScreen® Solar Resource and Heating Load Calculation - Solar Water Heating Project

Site Latitude and Collector Orientation		Estimate	Notes/Range
Nearest location for weather data		Guatemala	See Weather Database
Latitude of project location	°N	14.0	-90.0 to 90.0
Slope of solar collector	°	14.0	0.0 to 90.0
Azimuth of solar collector	°	0.0	0.0 to 180.0

Monthly Inputs						
Month	Fraction of month used (0 - 1)	Monthly average daily radiation on horizontal surface (kWh/m ² /d)	Monthly average temperature (°C)	Monthly average relative humidity (%)	Monthly average wind speed (m/s)	Monthly average daily radiation in plane of solar collector (kWh/m ² /d)
January	1.00	5.10	17.7	72.5	5.0	5.77
February	1.00	5.80	18.7	72.0	5.0	6.30
March	1.00	6.49	20.2	69.0	5.0	6.70
April	1.00	6.49	21.0	66.0	4.7	6.34
May	1.00	5.82	21.0	64.0	4.4	5.47
June	1.00	5.31	20.0	67.0	4.2	4.93
July	1.00	5.36	20.1	69.0	3.6	5.00
August	1.00	5.36	20.0	73.5	3.6	5.16
September	1.00	4.95	19.5	75.0	3.9	4.98
October	1.00	4.87	19.5	74.0	4.4	5.14
November	1.00	4.81	18.6	77.0	4.7	5.34
December	1.00	4.73	17.9	77.0	4.7	5.40
		Annual	1.98	1.98		
		Season of Use	2.02	2.02		
Solar radiation (horizontal)	MWh/m ²	1.98	1.98			
Solar radiation (tilted surface)	MWh/m ²	2.02	2.02			
Average temperature	°C	19.5	19.5			
Average wind speed	m/s	4.4	4.4			

Water Heating Load Calculation		Estimate	Notes/Range
Application type	-	Service hot water	
System configuration	-	With storage	
Building or load type	-	Hotel/Motel	
Number of units	Room	15	
Rate of occupancy	%	50%	50% to 100%
Estimated hot water use (at -60 °C)	L/d	589	
Hot water use	L/d	400	
Desired water temperature	°C	60	
Days per week system is used	d	7	1 to 7
Cold water temperature	°C	Auto	
Minimum	°C	18.9	1.0 to 10.0
Maximum	°C	20.0	5.0 to 15.0
Months SWH system in use	month	12.00	
Energy demand for months analysed	MWh	6.90	
	GJ	24.82	

[Return to Energy Model sheet](#)

Version 3.0

© Minister of Natural Resources Canada 1997-2005.

NRCan/CETC - Varennes

Figura I.1: Recurso solar

La figura I.2 muestra el modelo energético, es decir la solución técnica para cumplir con la demanda de energía. Los datos que se necesitan, básicamente son datos sobre el tipo de colector y el volumen del tanque. Para el análisis económico también es importante saber cuál es la fuente de energía que se usa para cubrir la demanda si no hay suficiente sol.

En presente caso, el programa sugiere la instalación de dos colectores de 3 m² cada uno y una capacidad del tanque de 240 litros. La fracción solar se calcula en un 60 %, es decir que el hotel tendrá que comprar el 40 % de la energía para el calentamiento de agua. Se puede mejorar la fracción solar hasta un 70 %, instalando un sistema más grande. Sin embargo, en éste caso, el tiempo de recuperación de la inversión de enlargaría.

Figura I.2: Modelo energético

RETScreen® Energy Model - Solar Water Heating Project		Training & Support
Site Conditions		
Project name	Hotel	Notes/Range
Project location	Guatemala	See Climate Manual
Nearest location for weather data	Guatemala	Complete SRA/H sheet
Annual solar radiation (tilted surface)	MWh/m _a	2.02
Annual average temperature	°C	19.5
Annual average wind speed	m/s	4.4
Desired load temperature	°C	60
Hot water use	L/d	400
Number of months analysed	month	12.00
Energy demand for months analysed	MWh	6.90
System Characteristics		
Application type	Service hot water (with storage)	
Base Case Water Heating System		
Heating fuel type	Electricity	
Heating system seasonal efficiency	100%	55% to 350%
Solar Collector		
Collector type	Glazed	
Solar water heating collector manufacturer	No Name	See Technical Note 1
Solar water heating collector model	ABC	See Product Database
Area per collector	m _a	3.00
Fr (tau alpha) coefficient		0.74
Fr UL coefficient	(W/m ² °C)	5.00
Suggested number of collectors		2
Number of collectors		2
Total collector area	m _a	6.0
Storage		
Ratio of storage capacity to coll. area	L/m _a	40.0
Storage capacity	L	240
Balance of System		
Heat exchanger/antifreeze protection	yes/no	No
Suggested pipe diameter	mm	10
Pipe diameter	mm	10
Pumping power per collector area	W/m _a	10
Piping and solar tank losses	%	5%
Losses due to snow and/or dirt	%	5%
Horz. dist. from mech. room to collector	m	10
# of floors from mech. room to collector		2
Annual Energy Production (12.00 months analysed)		
Pumping energy (electricity)	MWh	0.11
Specific yield	kWh/m _a	693
System efficiency	%	34%
Solar fraction	%	60%
Renewable energy delivered	MWh	4.16
	GJ	14.98

La figura I.3 muestra los costos del equipo a instalar, los cuales se ingresan como costos unitarios. RETScreen presenta rangos de precios para guiarle al usuario. También incluye costos de proyección, instalación y mantenimiento.

La figura I.4 muestra el análisis financiero. Solo se requieren unos parámetros económicos y el costo actual de la energía para realizar el cálculo. Se nota que la inversión, en éste caso particular, ya en el quinto año resulta en un flujo de caja positivo.

El punto que requiere bastante atención, es la estimación de la demanda. Para hoteles, en general la demanda fluctua mucho durante el año, puede haber más demanda durante los fines de semana o picos de unos días cuando hay eventos. Sin embargo, el objetivo de RETScreen no es dimensionar sistemas, sino realizar un análisis económico rápido.

Figura I.3: Costos

RETScreen® Cost Analysis - Solar Water Heating Project

Type of project: Currency: Cost references:

Initial Costs (Credits)	Unit	Quantity	Unit Cost	Amount	Relative Costs	Quantity Range	Unit Cost Range
Feasibility Study							
Other - Feasibility study	Cost	1	\$ 100	\$ 100		-	-
Sub-total:				\$ 100	2.4%		
Development							
Other - Development	Cost	0	\$ -	\$ -		-	-
Sub-total:				\$ -	0.0%		
Engineering							
Other - Engineering	Cost	2	\$ 100	\$ 200		-	-
Sub-total:				\$ 200	4.8%		
Energy Equipment							
Solar collector	m_	6.0	\$ 250	\$ 1,500		-	-
Solar storage tank	L	240	\$ 2.50	\$ 600		-	-
Solar loop piping materials	m	39	\$ 5.00	\$ 193		-	-
Circulating pump(s)	W	60	\$ 2.00	\$ 120		-	-
Heat exchanger	kW	0.0	\$ -	\$ -		-	-
Transportation	project	1	\$ 100	\$ 100		-	-
Other - Energy equipment	Cost	0	\$ -	\$ -		-	-
Sub-total:				\$ 2,513	60.9%		
Balance of System							
Collector support structure	m_	6.0	\$ 25	\$ 150		-	-
Plumbing and control	project	1	\$ 400	\$ 400		-	-
Collector installation	m_	6.0	\$ 10	\$ 60		-	-
Solar loop installation	m	39	\$ 1.00	\$ 39		-	-
Auxiliary equipment installation	project	1	\$ 50	\$ 50		-	-
Transportation	project	1	\$ -	\$ -		-	-
Other - Balance of system	Cost	0	\$ -	\$ -		-	-
Sub-total:				\$ 699	16.9%		
Miscellaneous							
Training	p-h	4	\$ 60	\$ 240		-	-
Contingencies	%	10%	\$ 3,752	\$ 375		-	-
Sub-total:				\$ 615	14.9%		
Initial Costs - Total				\$ 4,127	100.0%		
Annual Costs (Credits)							
O&M							
Property taxes/insurance	project	0	\$ -	\$ -		-	-
O&M labour	project	1	\$ 15	\$ 15		-	-
Other - O&M	Cost	0	\$ -	\$ -		-	-
Contingencies	%	10%	\$ 15	\$ 2		-	-
Sub-total:				\$ 17	39.3%		
Electricity	kWh	106	\$ 0.2400	\$ 25	60.7%		
Annual Costs - Total				\$ 42	100.0%		
Periodic Costs (Credits)							
Valves and fittings	Cost	10 yr	\$ 250	\$ 250		-	-
Pool heat pump compressor	Credit	10 yr	\$ 1,200	\$ (1,200)		-	-
End of project life				\$ -			Go to GHG Analysis sheet

Version 3.0 © Minister of Natural Resources Canada 1997-2005. NRCAnCETC - Varennes

Figura I.4: Resumen financiero

RETScreen® Financial Summary - Solar Water Heating Project

Annual Energy Balance				Yearly Cash Flows				
Project name	Hotel	Electricity required	MWh	0.11	Year	Pre-tax	After-tax	Cumulative
Project location	Guatemala	Net GHG reduction	t _{CO2e} /yr	2.05	0	(4,127)	(4,127)	(4,127)
Renewable energy delivered	MWh				1	984	984	(3,143)
Heating fuel displaced	-	Electricity	Net GHG emission reduction - 25 yrs	t _{CO2e}	2	1,013	1,013	(2,130)
					3	1,042	1,042	(1,088)
					4	1,073	1,073	(15)
					5	1,104	1,104	1,089
					6	1,135	1,135	2,224
					7	1,168	1,168	3,392
					8	1,202	1,202	4,594
					9	1,236	1,236	5,830
					10	3,323	3,323	9,153
					11	1,308	1,308	10,462
					12	1,346	1,346	11,807
					13	1,384	1,384	13,191
					14	1,423	1,423	14,614
					15	1,463	1,463	16,077
					16	1,505	1,505	17,582
					17	1,547	1,547	19,129
					18	1,590	1,590	20,719
					19	1,635	1,635	22,354
					20	6,108	6,108	28,462
					21	1,727	1,727	30,189
					22	1,774	1,774	31,963
					23	1,823	1,823	33,787
					24	1,873	1,873	35,660
					25	1,924	1,924	37,584

Financial Parameters				
Avoided cost of heating energy	\$/kWh	0.240	Debt ratio	0.0%
GHG emission reduction credit	\$/t _{CO2e}	-	Income tax analysis?	yes/no <input type="text" value="No"/>
Retail price of electricity	\$/kWh	0.240		
Energy cost escalation rate	%	3.0%		
Inflation	%	8.0%		
Discount rate	%	10.0%		
Project life	yr	25		

Project Costs and Savings				
Initial Costs			Annual Costs and Debt	
Feasibility study	2.4%	\$ 100	O&M	\$ 17
Development	0.0%	\$ -	Electricity	\$ 25
Engineering	4.8%	\$ 200		
Energy equipment	60.9%	\$ 2,513	Annual Costs and Debt - Total	\$ 42
Balance of system	16.9%	\$ 699		
Miscellaneous	14.9%	\$ 615	Annual Savings or Income	
Initial Costs - Total	100.0%	\$ 4,127	Heating energy savings/income	\$ 998
Incentives/Grants		\$ -		
			Annual Savings - Total	\$ 998
Periodic Costs (Credits)				
Valves and fittings	\$	250	Schedule yr # 10.20	
Pool heat pump compressor	\$	(1,200)	Schedule yr # 10.20	
End of project life	\$	-		

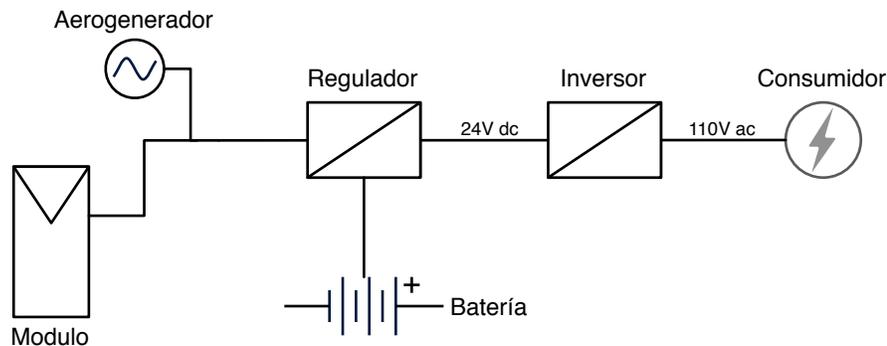
Financial Feasibility				
Pre-tax IRR and ROI	%	27.9%	Calculate GHG reduction cost?	yes/no <input type="text" value="No"/>
After-tax IRR and ROI	%	27.9%		
Simple Payback	yr	4.3	Project equity	\$ 4,127
Year-to-positive cash flow	yr	4.0		
Net Present Value - NPV	\$	8,543		
Annual Life Cycle Savings	\$	941		
Benefit:Cost (B-C) ratio	-	3.07		

II. Análisis de un sistema híbrido utilizando HOMER

HOMER es un modelo de optimización de micro energía para el diseño de sistemas fuera de la red e interconectados a la red. El programa calcula la combinación de componentes de menor costo que satisface la demanda eléctrica y térmica. El programa fue desarrollado por NREL y está disponible en la página de internet: www.nrel.gov.

En el presente caso se calcula un sistema solar-eólico para una estación de investigación en Punta de Manabique, realizado en agosto de 2004 por Fundación Solar. La demanda para la estación se estimó en 2 kWh por día. Para cubrir la demanda el proveedor instaló un generador fotovoltaico de 600 Watt y un pequeño aerogenerador de 400 Watt (figura II.1) en base de su experiencia.

Figura II.1: Esquema del sistema de energía.



Fuente: autor.

El sistema está funcionando bien, aunque hay que mencionar que la demanda actual por el momento es menor que la diseñada, porque la estación no está trabajando a su capacidad. En presente caso se verificará el diseño usando el programa HOMER.

Los datos necesarios para realizar el cálculo básicamente son datos del recurso solar y eólico, datos de los rangos de potencia del generador fotovoltaico y eólico, y datos de los costos de los componentes.

La figura II.2 muestra los datos del recurso solar que se tomaron de la base de datos SWERA. Se observa que el recurso solar es menor (alrededor de 4 kWh/m² por día) durante los meses octubre hasta enero. Es la época cuando más viento hay. Sin embargo, no se sabe exactamente cuánto viento hay. Los mapas del recurso eólico no son útiles en este caso porque el recurso en el lugar está en el menor rango de la escala del mapa, es decir entre 0 y 5.5 m/s en una altura de 50 metros sobre la tierra.

Aún así, sin conocimiento exacto del viento, HOMER puede ayudar en analizar el sistema porque calcula el sistema para un rango de

La figura II.3 muestra la curva de potencia de la turbina escogida y la figura II.4 los costos del generador FV y la turbina para el rango de simulación. Hay dos líneas, porque el reemplazo del equipo tiene un costo mas bajo que la instalación inicial. Se observa, que para el rango escogido, los costos son lineares, es decir no existe efecto de escala.

Figura II.1: Recurso solar del sitio.

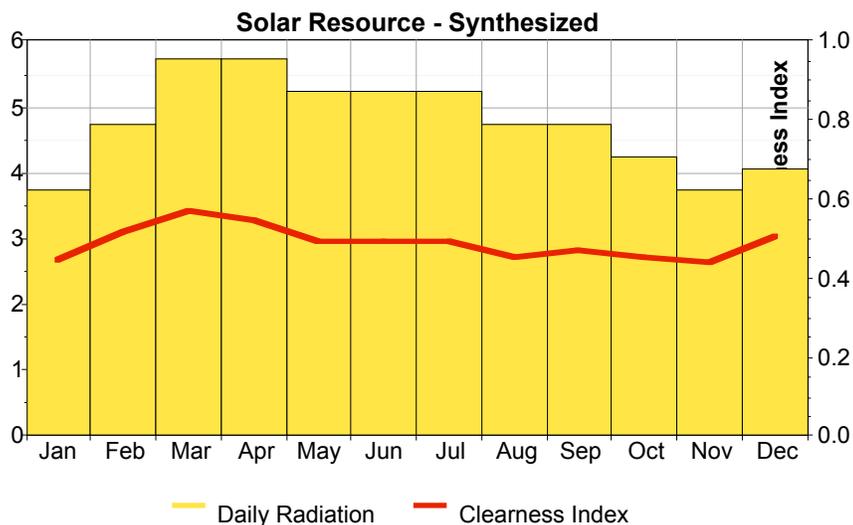


Figura II.2: Curva de potencia del aerogenerador.

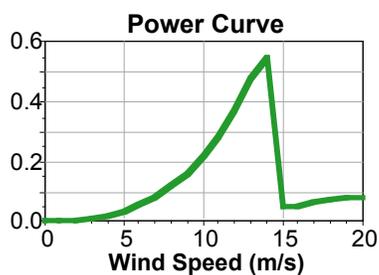
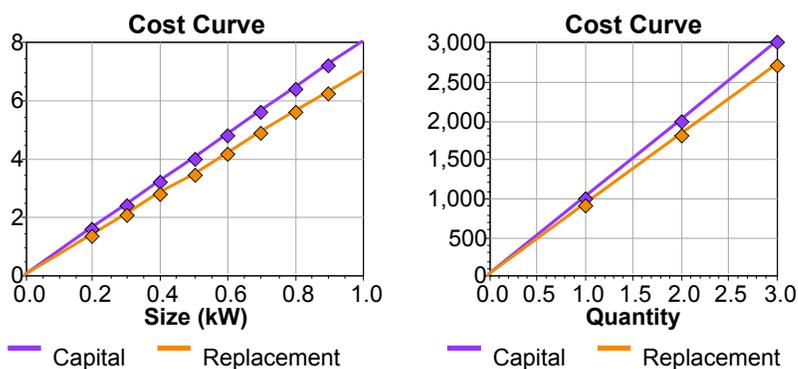


Figura II.3: Costo de Generador FV y el aerogenerador.



Las figuras III.4 y III.5 muestran los resultados del cálculo realizado con HOMER. Las gráficas muestran las soluciones más económicas en función de la demanda y la velocidad promedio del viento, superponiendo la potencia del generador FV y el costo inicial del sistema, respectivamente.

El diseño del sistema realizado en Punta de Manabique se encuentra en el círculo. HOMER indica que la turbina es viable si hay un viento de 4 m/s o más. Sin la turbina, el sistema se hubiera realizado con un generador fotovoltaico de 800 Watt.

Se puede observar que para sistemas aislados con una demanda de 1 kWh por día o más, es económicamente interesante cubrir una parte de la demanda con un aerogenerador, siempre cuando el viento sopla mas fuerte que 4 m/s. Para sistemas más pequeños, la energía eólica no es una opción viable.

Figura II.4: Sistema óptimo y potencia del generador fotovoltaico (kW).

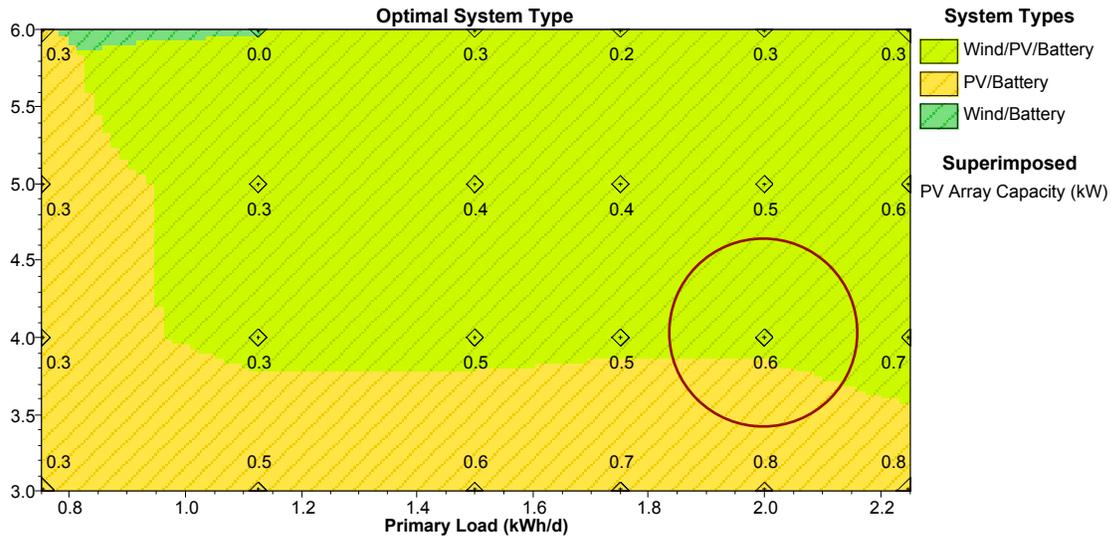
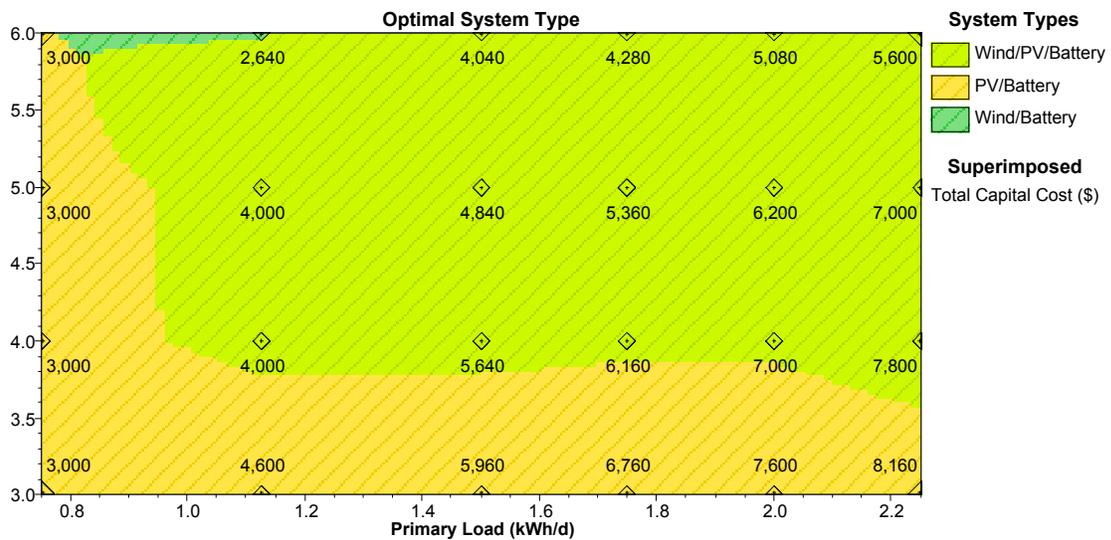


Figura II.5: Sistema óptimo y costo inicial del sistema (US\$).



III. Productos SWERA

Documentos disponibles en la base de datos de SWERA

Energía solar y eólica

1. *Estaciones seleccionadas y elevación en Centroamérica*; Área: América latina y el Caribe; Tipo: documento; Categoría: SWERA; Fecha: 2003-Dec-11; Disponible: meta datos, imagen, datos

2. *Visita de país mayo de 2003*; Área: Guatemala; Tipo: documento; Categoría: SWERA; Fecha: 2003; Disponible: meta datos, datos.

Energía eólica

1. *Datos de la densidad de la potencia eólica (W/m²) (final) a 50 m sobre el nivel del suelo*; Área: América Latina y el Caribe; Tipo: datos; Categoría: SWERA; Fecha: 2004-Oct-07; Disponible: meta datos, imagen, datos.

2. *Mapas de la densidad de la potencia eólica (W/m²) (final) a 50 m sobre el nivel del suelo*; Área: América Latina y el Caribe; Tipo: documento; Categoría: SWERA; Fecha: 2004-Jun; Disponible: meta datos, datos.

Energía solar

1. *Año meteorológico típico para estaciones seleccionadas*; Área: América Latina y el Caribe; Tipo: datos; Categoría: suplementario; Fecha: 2004-Aug-02; Disponible: meta datos, imagen, datos.

2. *Radiación difusa por mes en base del modelo solar CSR*; Área: América Latina y el Caribe; Tipo: datos; Categoría: SWERA; Fecha: 2004-Jan-22; Disponible: meta datos, datos.

3. *Radiación directa normal por mes en base del modelo solar CSR*; Área: América Latina y el Caribe; Tipo: datos; Categoría: SWERA; Fecha: 2004-Jan-22; Disponible: meta datos, datos.

4. *Radiación global horizontal por mes en base del modelo solar CSR*; Área: América Latina y el Caribe; Tipo: datos; Categoría: SWERA; Fecha: 2004-Jan-22; Disponible: meta datos, datos.

5. *Radiación a inclinación de latitud por mes en base del modelo solar CSR*; Área: América Latina y el Caribe; Tipo: datos; Categoría: SWERA; Fecha: 2004-Jan-22; Disponible: meta datos, datos.

6. *Datos de la radiación en Guatemala en sitios y años específicos*; Área: Guatemala; Tipo: datos; Categoría: contribución; Fecha: 2004-Jun-28; Disponible: meta datos, datos.

7. *Radiación directa normal por mes en base del modelo solar SUNY*; Área: América Latina y el Caribe; Tipo: datos; Categoría: SWERA; Fecha: 2004-Jan-22; Disponible: meta datos, datos.

8. *Radiación global horizontal por mes en base del modelo solar SUNY*; Área: América Latina y el Caribe; Tipo: datos; Categoría: SWERA; Fecha: 2004-Oct-07; Disponible: meta datos, imagen, datos.
9. *Datos solares terrestres modelados por hora para estaciones seleccionadas*; Área: Centroamérica; Tipo: datos; Categoría: suplementario; Fecha: 2005-May-03; Disponible: meta datos, datos.
10. *La producción de datos de irradiación de alta resolución*; Área: América latina y el Caribe; Tipo: documento; Categoría: SWERA; Fecha: 2003-Jul; Disponible: meta datos, datos.
11. *Promedios anuales de la radiación directa normal en Centroamérica*; Área: América latina y el Caribe; Tipo: documento; Categoría: SWERA; Fecha: 2003-Dec-11; Disponible: meta datos, imagen, datos.
12. *Promedios mensuales de la radiación directa normal en Centroamérica*; Área: América latina y el Caribe; Tipo: documento; Categoría: SWERA; Fecha: 2003-Dec-11; Disponible: meta datos, imagen, datos.
13. *Promedios anuales para colectores planos con inclinación igual a la latitud en Centroamérica*; Área: América latina y el Caribe; Tipo: documento; Categoría: SWERA; Fecha: 2003-Dec-11; Disponible: meta datos, imagen, datos.
14. *Promedios mensuales para colectores planos con inclinación igual a la latitud en Centroamérica*; Área: América latina y el Caribe; Tipo: documento; Categoría: SWERA; Fecha: 2003-Dec-11; Disponible: meta datos, imagen, datos.
15. *Promedios anuales de la radiación global horizontal en Centroamérica*; Área: América latina y el Caribe; Tipo: documento; Categoría: SWERA; Fecha: 2003-Dec-11; Disponible: meta datos, imagen, datos.
16. *Promedios mensuales de la radiación global horizontal en Centroamérica*; Área: América latina y el Caribe; Tipo: documento; Categoría: SWERA; Fecha: 2003-Dec-11; Disponible: meta datos, imagen, datos.

IV. Mapas del recurso solar

<<imagen: RGH anual 40 por 40 km>>

<<imagen: RGL anual 40 por 40 km>>

<<imagen: RDN anual 40 por 40 km>>

<<imagen: RD anual 40 por 40 km>>

<<imagen: RGH mensual 40 por 40 km>>

<<imagen: RGL mensual 40 por 40 km>>

<<imagen: RDN mensual 40 por 40 km>>

<<imagen: RD mensual 40 por 40 km>>

<<imagen: RDN anual 10 por 10 km>>

V. Mapas del recurso eólico

<<imagen: overview Guatemala (sin Petén)>>

<<imagen: detalle occidente>>

<<imagen: detalle sur>>

<<imagen: detalle oriente>>