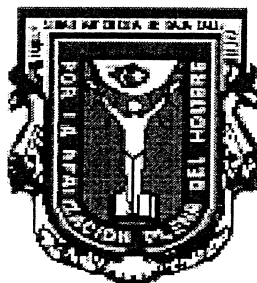


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS
MARINAS



*" Evaluación del Potencial Eólico y Solar para su posible uso en el
abastecimiento de electricidad a la comunidad de Bahía de los Ángeles,
Baja California."*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE OCEANÓLOGO

PRESENTA

Ricardo Rodrigo Hernández Hernández.

Ensenada, Baja California

Abril del 2001.

RESUMEN.

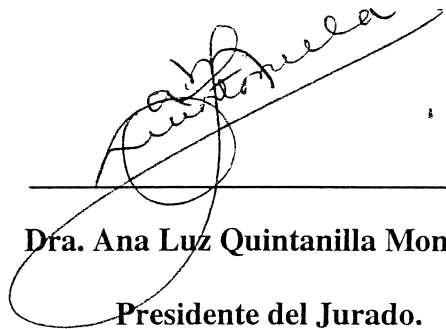
Se evaluó el recurso solar y eólico para la localidad de Bahía de los Ángeles, con la finalidad de verificar si los recursos indígenas de la zona son potencialmente utilizables para satisfacer las necesidades de energía eléctrica de la comunidad. Con base en los datos observados de rapidez de viento se pueden producir 14,764 kW hr por año haciendo uso de la turbina eólica BWC-EXCEL. Se calculó un potencial eólico de 365.27 (m/s)^3 integrando la función de densidad de probabilidad Weibull. Con respecto a los datos observados de radiación solar incidente se pueden producir de 124-240 kW hr/m² mensualmente, y con base en los datos de radiación solar calculada se pueden producir de 31-78 kW hr/m² mensualmente haciendo uso de sistemas fotovoltaicos de silicio cristalino. Los principales usos que se le dan a la energía eléctrica en la comunidad de Bahía de los Ángeles es la iluminación habitacional, en promedio de 4 a 5 focos de baja potencia y la alimentación de aparatos electrodomésticos, con un consumo promedio de 70 a 130 kW hr por mes. Las estimaciones obtenidas, mostraron que ambos recursos cubren satisfactoriamente las demandas de energía eléctrica de Bahía de los Ángeles, B.C.

***"EVALUACION DEL POTENCIAL EOLICO Y SOLAR PARA SU
POSIBLE USO EN EL ABASTECIMIENTO DE ELECTRICIDAD A
LA COMUNIDAD DE BAHIA DE LOS ANGELES, BAJA
CALIFORNIA."***

Tesis que presenta:

Ricardo Rodrigo Hernández Hernández.

Aprobada por:



Dra. Ana Luz Quintanilla Montoya.
Presidente del Jurado.



Dr. Sergio Reyes Coca.

Sinodal.



M.C. Sergio Larios Castillo.

Sinodal.

AGRADECIMIENTOS.

A mi directora de tesis Ana Luz Quintanilla Montoya, por brindarme su apoyo en todo momento.

A los miembros de mi comité: Sergio Larios y Sergio Reyes por sus consejos y su apoyo.

Al proyecto "Evaluación del potencial y posible uso de los recursos (solar ó eólico) para generación de electricidad y de las tecnologías de desalinización de agua de mar en Bahía de los Ángeles, Baja California / 99 " no. 4084 del Instituto de Investigaciones Oceanológicas.

A la Universidad Autónoma de Baja California.

A todos mis amigos y compañeros por compartir sus vidas conmigo.

A Miriam y Hortencia por su gran apoyo.

Y por supuesto a mis padres, quienes tienen casi todo el mérito de este título.

ÍNDICE.

	Página.
Agradecimientos.	iii
Índice.	iv
Índice de Tablas.	v
Índice de Figuras.	vi
I. INTRODUCCIÓN.	1
II. ANTECEDENTES.	6
III. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	16
IV. HIPÓTESIS DEL TRABAJO.	19
V. OBJETIVOS.	19
VI. METODOLOGÍA.	21
VI.1 Análisis de los datos de viento.	21
VI.2 Análisis de los datos de radiación solar.	26
VI.3 Análisis de la comunidad.	27
VII. RESULTADOS.	29
VII.1 Recurso Eólico.	29
VII.2 Recurso Solar.	34
VII.3 Tecnologías.	40
VII.3a Turbinas Eólicas.	40
VII.3b Celdas Fotovoltaicas.	43
VII.4 Resultados del análisis de la comunidad.	47
VIII. DISCUSIONES.	50
IX. CONCLUSIONES.	54
X. BIBLIOGRAFÍA.	56

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla I. Estadística General de la serie de tiempo de rapidez de viento, obtenida con el modelo Weibull.

Tabla II. Turbinas eólicas consideradas para calcular la energía producible.

Tabla III. Energía producida por las cuatro turbinas.

Tabla IV. Sistemas Fotovoltaicos.

Tabla V. Energía producible con base en el recurso solar.

ÍNDICE DE FIGURAS.

- Figura 1.** Irradiación Solar Directa Promedio diaria para la República Mexicana.
- Figura 2.** Promedio Anual de las horas mensuales de soleamiento para la República Mexicana.
- Figura 3.** Mapa del Recurso Eólico para las Zonas Rurales de la República Mexicana.
- Figura 4.** Localización del área de estudio.
- Figura 5.** Promedios diarios de rapidez del viento.
- Figura 6.** Promedios mensuales de rapidez de viento, presentados con su respectiva desviación estándar.
- Figura 7.** Gráfico de probabilidad Weibull para la rapidez del viento.
- Figura 8.** Características básicas de los datos observados de viento.
- Figura 9 (a).** Desviación estándar horaria de la rapidez del viento.
- Figura 9 (b).** Promedio horario de la rapidez del viento.
- Figura 10.** Promedios diarios de Radiación Solar Incidente.
- Figura 11.** Promedios mensuales de radiación incidente, presentados con su respectiva desviación estándar.
- Figura 12.** Radiación incidente calculada para la zona marítima y terrestre de Bahía de los Ángeles.
- Figura 13 (a).** Radiación solar incidente promedio horaria para la primavera de 1997.
- Figura 13 (b).** Radiación solar incidente promedio horaria para el invierno de 1997.

Figura 14. Comparación de promedios mensuales de radiación incidente y de rapidez del viento.

Figura 15. Curvas de energía de los cuatro tipos de turbinas, proporcionadas por la compañías fabricantes.

Figura 16. Energía producida por los cuatro tipos de turbina, con base en los datos observados de rapidez de viento.

Figura 17. Energía mensual producible con base en la radiación incidente observada.

I. INTRODUCCIÓN.

El abastecimiento de energía eléctrica en zonas rurales, principalmente en los países en desarrollo ha presentado marcadas deficiencias y carencias. Los planes y las políticas energéticas de países en vías de desarrollo han mostrado una falta de sensibilidad y de apoyo para los sectores rural y agrícola. Lo anterior quizá está basado en el pequeño impacto que ejercen éstas en el balance nacional energético debido al pobre consumo que tiene el sector rural (Best, 1992).

Las autoridades involucradas en las tomas de decisiones sobre aspectos energéticos no han propuesto mecanismos institucionales u operacionales para las áreas rurales; por otro lado, muchos de los planes y programas de desarrollo rural o agrícola no se han planteado de una manera explícita en lo relativo a los requerimientos energéticos.

Las causas son variadas pero existe falta de conocimiento y de interés, aunado a condiciones políticas y económicas que impiden la sustitución de las fuentes convencionales de energía (quema de hidrocarburos principalmente) por otras energías renovables. Asimismo, las agencias encargadas del desarrollo rural y agrícola se han mostrado incapaces de negociar con las compañías dedicadas a la generación eléctrica para encontrar la solución a las demandas energéticas de dichas comunidades.

Las demandas energéticas en áreas rurales se encuentran dirigidas principalmente al "sostenimiento básico" de las necesidades de las mismas. Dichas

actividades suelen ser la transportación, alimentación, iluminación, calefacción etc. en sus mínimas expresiones, es decir, se solicita el alumbrado de las casas, el tener acceso a un medio de comunicación (radio, TV), etc. Asimismo, también existe una gran demanda por parte de la agricultura, la cría de especies animales, la pequeña industria, el comercio local, entre otras actividades (Best, 1992). La demanda energética en comunidades remotas generalmente involucra varias formas de energía, desde el uso de animales para la agricultura (para el arado), la combustión de madera, carbón, petróleo, diesel, keroseno, gas y en mucha menor proporción el aprovechamiento de la energía eólica y solar, consideradas fuentes alternas de energía.

Las formas de energía más utilizadas en las regiones rurales son consideradas fuentes energéticas no comerciales, tal es el caso de la madera o leña, la cual es la fuente energética que representa más del 75 % de la energía rural consumida en los países en desarrollo, seguido por el uso de gas, petróleo y diesel generalmente usados para la maquinaria agrícola y la transportación, aunque también es usado para el bombeo de agua, la irrigación, y la generación de electricidad (Martínez, 1992). El mayor uso de una forma u otra de energía varía de una región a otra debido a razones geográficas, agro-ecológicas, socioeconómicas, y disponibilidad de recursos energéticos.

Los principales problemas de abastecimiento de energía en comunidades rurales son la carencia de fuentes locales, el derroche de energía debido a la carencia de información y programas de educación enfocados a la generación y uso eficiente de la

energía, la carencia de infraestructura adecuada, el aislamiento de dichas comunidades y por consiguiente una gran dificultad para la distribución de energía.

En nuestro país existen más de 50,000 localidades sin electrificar con una población menor a los 500 habitantes, donde el suministro de energía convencional se encuentra restringido por la falta de vías de comunicación y de infraestructura, además el costo de instalación del tendido eléctrico a esas comunidades no es costeable al compararlo con los bajos consumos que se generarían (Best, 1992). Sin embargo, si consideramos que requieren de este servicio encontraremos que existen disponibles fuentes no convencionales de energía que son capaces de generar la energía eléctrica requerida para este tipo de comunidades.

Las fuentes no convencionales de energía entre las que encontramos la energía solar, energía eólica, hidroeléctrica y de biomasa, (entre otras), tienen el inconveniente de que el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica a través de su empleo implica un capital inicial elevado, el cual muchas veces no les permite competir con el bajo precio de los combustibles fósiles, sin embargo, este tipo de proyectos tienen la ventaja de pagar su costo de instalación en periodos relativamente cortos (3 a 5 años) y además no requieren capital para abastecerlos de combustible para seguir funcionando, por lo cual no existen desechos tóxicos que se emitan a la atmósfera y son bastante longevos en cuanto a su tiempo de vida de manera que los costos de operación y mantenimiento son mínimos comparados con plantas de energía convencional.

Las fuentes de energía renovable y con reservas probadas en Baja California son la geotérmica, microhidroeléctrica, biomasa, eólica, solar y mareal. El potencial de

energía para varios de estos recursos ha sido estimado: geotermal (1,000 MW de reservas probados), solar (3.3-6.9 kWh/m²), eólica (100-250 W/m²), microhidroeléctrico (80 MW), y mareal (1,200 MW) (Huacuz, 1995).

Aún a pesar de esta impresionante variedad de recursos existen muy pocos proyectos enfocados en el desarrollo de éstos para producir cantidades significantes de energía. La razón de lo anterior es el bajo costo de los combustibles fósiles comparados con los altos costos de capital inicial para la mayoría de los proyectos ya que nuestro país cuenta con una gran abundancia de petróleo y gas y una gran escasez de capital.

En Baja California en la actualidad, la red de abastecimiento de electricidad llega hasta la localidad del Rosario (aproximadamente a 300 Km al sur de Ensenada) y no se ha planteado siquiera el extenderla hacia otras pequeñas comunidades localizadas más al sur, aún cuando éstas varían en población desde los 200 hasta los 500 habitantes (Quintanilla-Montoya, 1999).

El presente estudio se enfoca a una pequeña comunidad rural costera llamada Bahía de los Ángeles, que se encuentra a 480 Km al sur de Ensenada, B.C. Bahía de los Ángeles presenta la problemática de estar siendo electrificada mediante el uso de un motogenerador diesel que debe ser alimentado por combustible, éste debe ser transportado de distancias de hasta 100 a 300 kilómetros y por ende hace que los costos que pagan los habitantes de la localidad sean sumamente altos (3.50 pesos/kw) en promedio. Si estos se comparan con los de una tarifa comercial en zonas urbanas (1.30 kw) crean la imperiosa necesidad de resolver sus necesidades de abastecimiento del

servicio de electricidad mediante el uso de recursos indígenas a la localidad que puedan ser autoregulados y administrados por los propios habitantes.

Debido a que la población de Bahía de los Ángeles es muy pequeña, la electrificación convencional mediante la extensión de la red eléctrica no es redituable, por lo que esta alternativa no ha sido considerada por los tomadores de decisiones, asimismo la comunidad está planteando a los gobiernos (municipal y estatal) el que se instale una gasolinera que asegure la provisión de combustible para abastecerse de electricidad y para asegurar el transporte de otros utensilios básicos (alimentos, medicinas, etc.). Recientemente, en el año 1999, el gobierno estatal inició un programa de instalación de celdas fotovoltaicas a cuatro comunidades rurales (Cataviña, Punta Prieta, Nuevo Rosarito y Santa Rosalita), sin embargo, no se tiene conocimiento si esta primera iniciativa se ha acompañado de un programa de educación sobre la generación y uso eficiente de la electricidad, más aún, si se ha capacitado a los habitantes de las mismas para mantener y autoregular los equipos que les fueron proporcionados (Quintanilla-Montoya, 1999).

El presente estudio evalúa los recursos solar y eólico disponibles en la localidad de Bahía de los Ángeles con la finalidad de verificar si ambos recursos pueden ser utilizados para la generación de electricidad por medio de turbinas eólicas y/o sistemas fotovoltaicos (unifamiliares o redes locales) y así poder satisfacer las demandas energéticas de la comunidad, sustituyendo los generadores eléctricos de motor a diesel, los cuales presentan desventajas ambientales, económicas y funcionales.

II. ANTECEDENTES.

En numerosas partes del mundo se han probado y concretado proyectos relacionados con el abastecimiento energético mediante fuentes alternativas de energía a comunidades aisladas y remotas. A continuación se mencionan algunos ejemplos de comunidades que se han beneficiado mediante el uso de energías alternativas.

En el sur de Australia, en *Cooper Pety* en marzo de 1991 se montó un proyecto con la finalidad de demostrar que el uso de una turbina eólica podía reducir considerablemente el uso de diesel en esta comunidad remota, la cual se encuentra en una región de vientos de baja velocidad (4 m/s). Asimismo, también se investigaron los aspectos operacionales del sistema combinado eólico – diesel. Este proyecto demostró la capacidad de la turbina eólica bajo un patrón de vientos de baja velocidad en la reducción de la combustión de diesel; anualmente se ahorraron 96,000 litros de diesel durante los dos primeros años. Por otro lado el nivel de ruido producido por las turbinas eólicas es mucho menor que el generado por los sistemas diesel y los equipos actuales han disminuido considerablemente ésta desventaja (*CADDET*, 1999).

En los territorios del norte de Rusia, alrededor de 20 millones de personas viven en áreas fuera del acceso a la red eléctrica, por tal motivo el gobierno ruso ha desarrollado planes para gastar 1.7 billones de dólares hasta el año 2000 en el rubro de energías alternativas. Los objetivos de este proyecto fueron demostrar el ahorro de costos de energía e infraestructura de un 80 % a 95 % con aplicaciones diferentes a la ampliación de la red eléctrica convencional (*CADDET*, 1999).

Inicialmente cinco sitios en la región de *Murmansk y Arkangelsk / Onega* en el norte de Rusia fueron seleccionados para instalar cinco sistemas híbridos eólico-diesel y un sistema de generación de poder por medio de biomasa que utiliza desechos madereros (ramas, hojas, corteza etc.). Este programa se ha ido expandiendo desde el verano de 1996, e incluye planes para la instalación de más de 40 turbinas eólicas en 10 localidades. Con este proyecto se está demostrando que el uso de sistemas híbridos puede reducir el uso de diesel en cientos de pequeñas comunidades aisladas y con un impacto ambiental bastante más amigable que el generado por los sistemas diesel, (CADDET, 1999).

Otro ejemplo es la comunidad de Matelot, en Trinidad y Tobago, donde se construyó una escuela comunitaria. Dicha escuela obtiene su electricidad por medio de un sistema híbrido eólico-solar-diesel; este sistema fue conectado oficialmente en mayo de 1992 por el ministro de energía de Trinidad y Tobago. El sistema combinado provee una fuente educativa para la escuela y la comunidad, así como también la posibilidad de monitorear los recursos solar y eólico en la remota costa norte de Trinidad y Tobago. El sistema eólico-solar fue integrado con un generador diesel capaz de suplir energía en los picos de mayor consumo. El valor de la electricidad para la comunidad de Matelot está más ligado a la elevación de la calidad de vida que con el costo de la generación de electricidad. El proyecto ha sido establecido para la confiable generación de electricidad donde antes no existía, la disponibilidad de electricidad en la escuela por las tardes ha ayudado al desarrollo de la comunidad, aunado a la disminución de emisiones de CO₂.

Este proyecto demostró que los sistemas híbridos basados en energías alternativas como el descrito con anterioridad son preferidos por las comunidades, que son confiables y reducen la dependencia al diesel en la generación eléctrica, (*CADDET*, 1999).

En Honduras existen más de 65,000 pequeños productores independientes de café, muchos de estos agricultores viven en áreas remotas que no tienen acceso a la red eléctrica nacional. Las baterías de automóviles son usadas para alimentar televisores blanco y negro; y la iluminación por medio de la red eléctrica es inexistente. Los problemas de comunicación, la carencia de asistencia técnica y la falta de financiamiento habían impedido el desarrollo de implementación de sistemas alternos para proporcionar energía. Sin embargo en Marcala, Honduras se estableció un proyecto de electrificación en áreas rurales pobres mediante sistemas solares fotovoltaicos que demostró la factibilidad de recuperación total de la inversión por parte de los usuarios. Este proyecto fue patrocinado por la compañía internacional no lucrativa *Enersol Associates Inc.* que se especializa en la implementación de proyectos fotovoltaicos. El proyecto ha proporcionado más de 100 sistemas fotovoltaicos a los agricultores de café en Marcala, los cuales proporcionan suficiente energía para la iluminación, para televisores blanco y negro, radios, ventiladores, licuadoras, etc. La compañía *Enersol* estableció un centro de soporte técnico en Tegucigalpa con la finalidad de proporcionar asistencia técnica y entrenamiento para la instalación y mantenimiento de los sistemas.

Los sistemas fueron importados por compañías europeas y americanas tales como *Solarex Corporation*, *Kyocera Inc.*, *Solec International* y *SumX Corporation*; la

compañía *Enersol* estableció un fondo de préstamo de \$20,000 dls (EUA) para ayudar a los cafetaleros a obtener sus sistemas, de esta manera los miembros de la cooperativa cafetalera obtuvieron varias formas para financiar sus sistemas, (*CADDET*, 1999).

La iluminación eléctrica por medio de los sistemas fotovoltaicos reemplaza las lámparas de keroseno, las cuales representan una seria amenaza para producir incendios, degrada la calidad del aire dentro de las viviendas debido a la emisión de monóxido de carbono, sulfuros, dióxidos y óxidos de nitrógeno, por cada reemplazamiento de una lámpara de keroseno por un sistema fotovoltaico también se está reemplazando de tres a seis toneladas de dióxido de carbono cada año.

Aproximadamente el 86% de la población vietnamita no tiene electrificación convencional y existen escasas oportunidades para la ampliación de la red eléctrica nacional. La *Unión de Mujeres Vietnamitas* que representa aproximadamente a 11 millones de mujeres asiáticas ha puesto en operación un proyecto de electrificación rural llamado “Proyecto Solar en apoyo a la Mujer Rural” el cual tiene como objetivo proveer electricidad, mejorar las condiciones de vida, incrementar los ingresos y desarrollar la economía familiar en las comunidades aisladas.

Este proyecto ha recibido ayuda financiera y soporte técnico de la fundación *Solar Electric Light Fund*, por la fundación *Rockefeller Brothers Fund* y por *Sandia National Laboratories*. El proyecto ha instalado más de 130 sistemas domésticos fotovoltaicos, 5 sistemas fotovoltaicos centrales para la comunidad, iluminación en las calles y en dos mercados comunitarios; este proyecto fue completado a principios del año de 1995.

Más de 2,000 personas han sido beneficiadas por las instalaciones. La *Unión de Mujeres Vietnamitas* pretende expandir el programa piloto a un programa nacional de electrificación solar. Los sistemas pueden proveer aproximadamente 4 horas de luz y considerables horas de electricidad para televisión y otros aparatos por día. Durante el curso del proyecto 350 familias manifestaron su interés por unirse al proyecto. En este proyecto también se reporta el reemplazamiento de lámparas de keroseno. Por otro lado los sistemas fotovoltaicos también han evitado la liberación de 39,195 Kg de carbón de la atmósfera cada año, (CADDET, 1999).

En México también se han desarrollado proyectos para electrificar comunidades aisladas, la comunidad de Xcalak en Chetumal (Yucatán) es una de ellas. Xcalak es una comunidad pesquera con actividad turística, con una población aproximada de 250 personas. Las principales actividades turísticas que se realizan en la localidad son la pesca deportiva y el buceo. Xcalak es un poblado no muy desarrollado, la red eléctrica más cercana se encuentra a 110 Km de la localidad y la estimación de los costos para la extensión de la red eléctrica sobrepasa los 3.2 millones de pesos, por lo que esta opción no es redituable, y por ello, la comunidad ha sido alimentada eléctricamente por generadores diesel, pero esta opción había sido bastante problemática y poco confiable.

En 1992 Xcalak fue electrificada a un costo de aproximadamente \$ 550,000 pesos, con un sistema híbrido (solar/eólico) consistente de 6 turbinas eólicas de 7.5 kW marca Bergey y un arreglo fotovoltaico de 11 kW. El sistema también incluye un gran banco de baterías (400 kWh) y un inversor estático de 40 kW. Hasta la mitad de 1995 el sistema había trabajado sin un sistema de respaldo (generador diesel), así que toda la

electricidad provenía únicamente del sol y del viento. Incluso ahora el generador diesel de respaldo es utilizado muy esporádicamente debido a los altos costos operacionales y a las frecuentes averías.

El sistema anterior ha trabajado conforme a lo esperado, pero desafortunadamente el sistema en la actualidad no satisface la demanda local debido a que el consumo ha crecido más de tres veces lo proyectado originalmente. La electricidad en el poblado está disponible de 8 a 16 horas al día dependiendo principalmente del recurso eólico. La energía del viento provee aproximadamente el 85% de la electricidad generada. El sistema fue extensivamente instrumentado y monitoreado en los primeros cinco años por el *U.S. National Renewable Energy Laboratory* (NREL) y el *Sandia National Laboratory* para aprender más acerca del real desempeño de los sistemas híbridos en las comunidades aisladas.

Otro ejemplo en México es la comunidad de San Juanico, localizada en la costa oeste de la península de Baja California, es una pequeña comunidad pesquera, con una actividad turística considerable (principalmente por el *surfing*). Un número considerable de *surfers* del sur de California visitan San Juanico cuando el oleaje de gran altura se pronostica para la localidad. La localidad con electrificación convencional más cercana se encuentra aproximadamente a 30 km de distancia y la ampliación de la red eléctrica no es redituable. La comunidad de San Juanico era abastecida de electricidad por un generador diesel (200 kW), el cual era subsidiado por el gobierno estatal de Baja California Sur. Posteriormente la comunidad tuvo que pagar el combustible y el mantenimiento del generador, por lo que los pobladores sólo podían suplir de 3 a 5

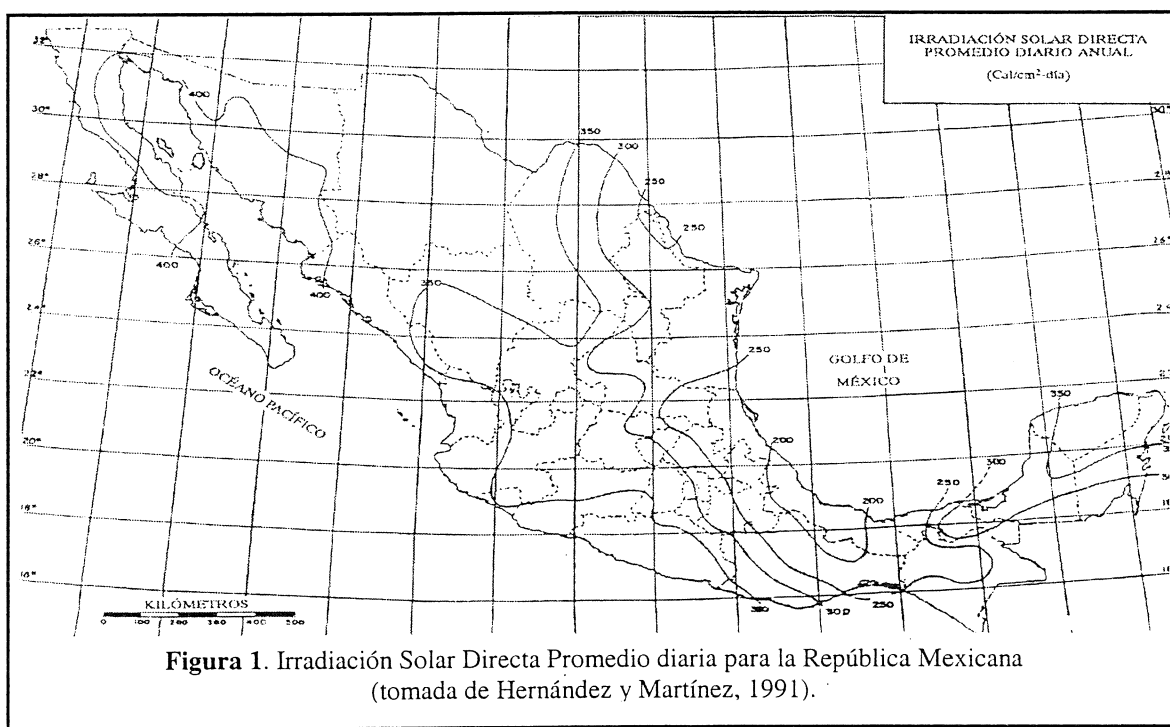
horas de energía cada noche (en horas pico); la escuela no contaba con electricidad durante el día, y los negocios tenían que suplirse su propia energía para la refrigeración. En San Juanico aparte del generador diesel comunitario, existían más de 40 pequeños generadores diesel y de gas.

En 1996, una compañía americana *Arizona Public Service* (APS), en cooperación con la Comisión Federal de Energía (CFE) montaron un proyecto para electrificar algunas comunidades mexicanas utilizando energía solar y eólica. El financiamiento medular del proyecto proviene de un tratado entre *Arizona Public Service* (APS) y *Niagara Mohawk Power Company*. Después de inspeccionar una docena de comunidades en los estados de Baja California Sur y Sonora, la APS y CFE decidieron establecer el proyecto para ajustar un sistema híbrido (solar/eólico). El sistema fue instalado a inicios de 1999 y fue oficialmente inaugurado por el gobernador en Mayo de 1999. El sistema consiste de 10 turbinas eólicas de 7.5 kW (marca Bergey) montadas en torres metálicas de 37 m de altura, además existe un nuevo generador diesel más eficiente. El estado de Baja California Sur en la actualidad está desarrollando planes para electrificar docenas de comunidades costeras aisladas para los próximos años, (*Bergey Windpower Company*, 1999). En la actualidad existen 30 localidades mexicanas que usan sistemas eólicos y algunas más instalaciones bajo desarrollo, (*Bergey WindPower Company*, 1999).

Se han mencionado ya algunos ejemplos de los innumerables casos de aplicación de sistemas alternos de energía en todo el mundo que satisfacen las necesidades energéticas de las zonas rurales aisladas, en donde se carece de

electrificación convencional. Los casos presentados con anterioridad demuestran los beneficios ambientales, económicos y sociales que traen consigo el uso de energías alternas.

Es importante señalar que México cuenta con una gran disponibilidad de recursos solar y eólico que pueden ser aprovechados. La península de Baja California está caracterizada por tener un gran potencial eólico y solar; lo que permite suponer que las comunidades rurales que carecen de electrificación convencional tienen la posibilidad de explotar los recursos renovables de la zona para satisfacer sus necesidades energéticas básicas. Específicamente Bahía de los Ángeles, B.C. es una comunidad aislada con condiciones muy favorables para establecer un proyecto de electrificación fotovoltaica, ya que es una de las zonas que presenta los valores más altos de irradiación solar directa en toda la República Mexicana, (ver figura 1).



Asimismo Bahía de los Ángeles cuenta con un gran soleamiento mensual (300 horas mensuales). Estas horas de soleamiento se refieren a la disponibilidad de sol directo en un área determinada (ver figura 2). Esto indica que debido a la localización geográfica de Bahía de los Ángeles el recurso solar se puede aprovechar más horas al día que cualquier otro lugar de la República Mexicana.

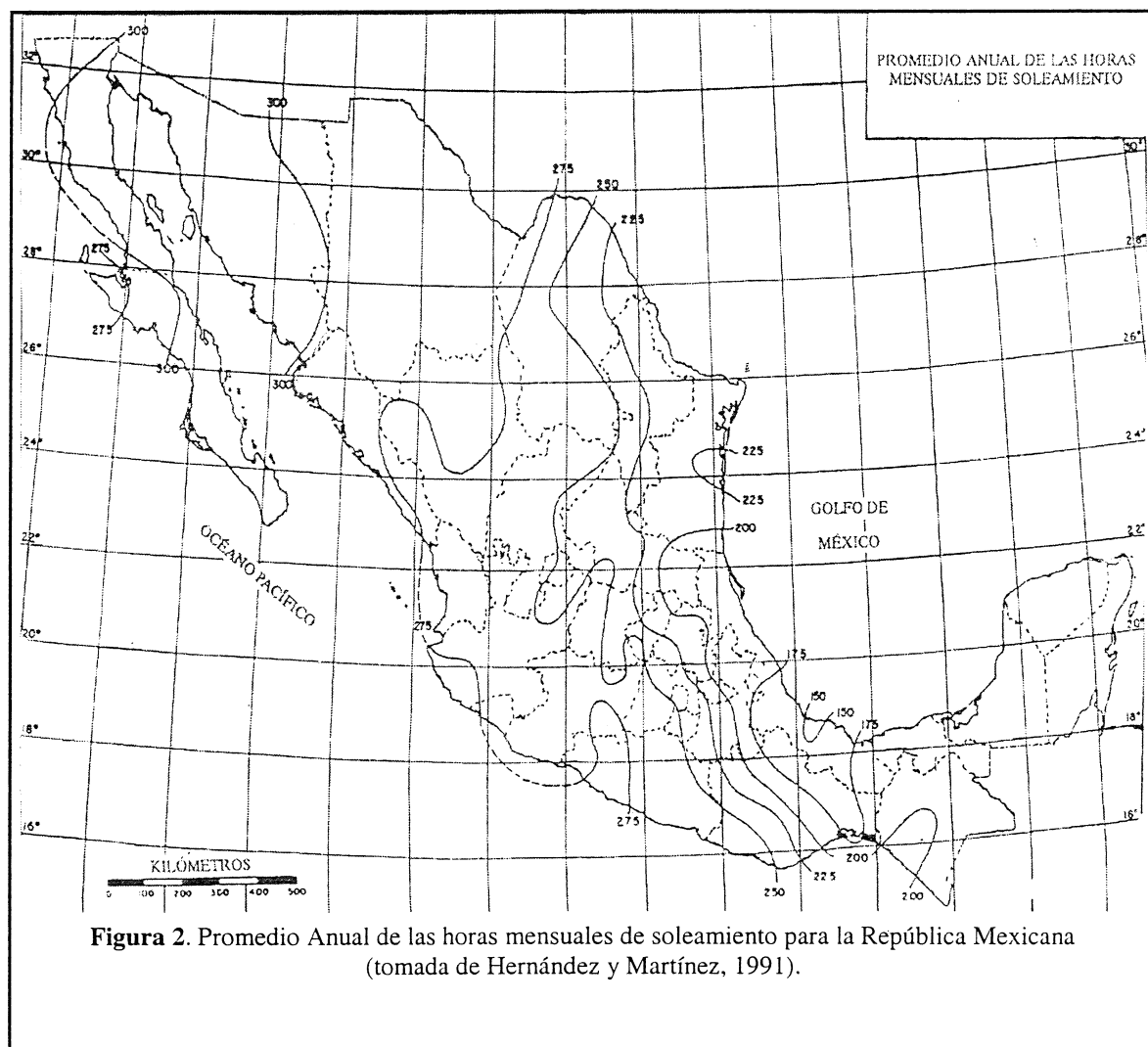
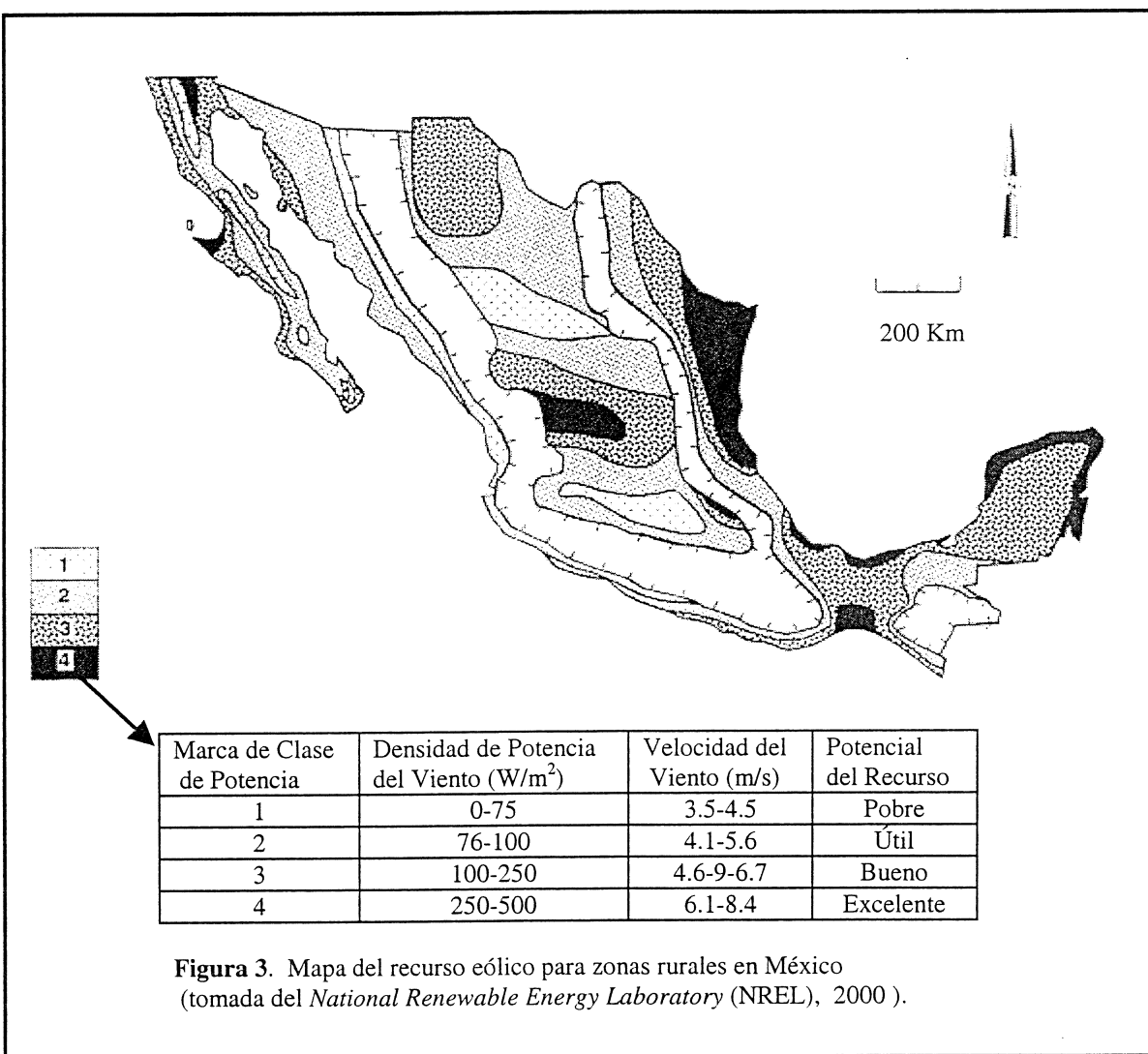


Figura 2. Promedio Anual de las horas mensuales de soleamiento para la República Mexicana (tomada de Hernández y Martínez, 1991).

Por otro lado, Bahía de los Ángeles también cuenta con una buena disponibilidad del recurso eólico. Según el *National Renewable Energy Laboratory* en la localidad el recurso eólico es considerado en general “de útil a bueno” (ver figura 3) con capacidad de producir un potencial eólico de 75 – 250 Watts/m² (NREL, 2001).



III. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Bahía de los Ángeles es una pequeña comunidad rural costera que se encuentra a 480 kilómetros de distancia al sur de Ensenada, ubicada a los 28° 50' N y los 113° 40' W en la costa Este del Golfo de California (figura 4). La bahía está formada por una angosta playa de arena respaldada por las montañas rocosas de Calamajué y San José. Frente a la bahía se encuentran una serie de islas: Coronado, Ventana, Cabeza de Caballo, Calavera, Angel de la Guarda, (la mayor de todas).

Bahía de los Ángeles tiene una población aproximada de 300 habitantes. Las principales actividades económicas de esta comunidad son la pesca y el turismo; a lo largo de casi todo el año un gran número de turistas visitan Bahía de los Ángeles. Además existen servicios de hotel, restaurantes, espacio para acampar y para casas móviles, rampa de cabotaje, tienda de abarrotes, una farmacia, un museo y una clínica médica.

Existe un limitado suministro de agua potable, casi toda el agua potable se extrae de un pozo que se encuentra aproximadamente a 12 kilómetros del pueblo; el agua es bombeada y transportada hasta el pueblo, pero el servicio es bastante ineficiente.

La electricidad es suministrada parcialmente a la comunidad por un generador diesel que generalmente trabaja de las 10:00 a las 22:00 hrs.

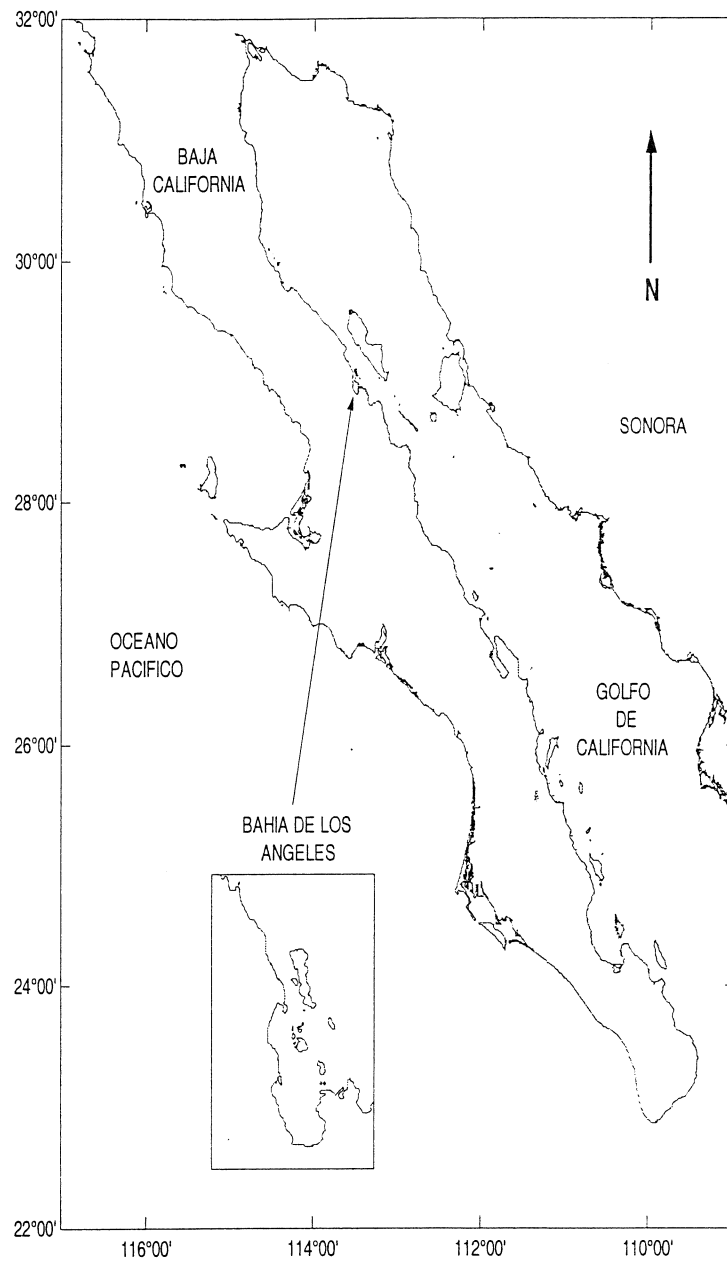


Figura 4. Localización del área de estudio

El servicio es muy problemático por las constantes fallas del generador y por la falta de combustible; cabe destacar que debido a la gran actividad turística, algunos hoteles en el poblado cuentan con una planta propia de generación eléctrica ó bien utilizan fuentes alternas (celdas fotovoltaicas, turbinas eólicas).

No existe suministro de gasolina en el pueblo por parte de PEMEX, por lo que la gasolina se tiene que conseguir en otros poblados (el más cercano se encuentra aproximadamente a 100 Km de distancia). Los autobuses tampoco llegan hasta el poblado, ya que éstos sólo transitan por la carretera transpeninsular y para llegar a éste se tiene que recorrer un camino de terracería de aproximadamente 40 Km.

Debido a que la población de Bahía de los Ángeles es muy pequeña, la electrificación convencional mediante la extensión de la red eléctrica no es redituable, por lo que esta alternativa no es posible.

Durante el verano la temperatura es realmente muy elevada, temperaturas de 43°C durante el día son normales y Agosto y Septiembre son meses húmedos. El Otoño y la Primavera presentan temperaturas más bajas alrededor de los 26°C, y es relativamente común que soplen vientos del Norte. En Invierno las temperaturas son cálidas durante el día (21°C a 26°C) y frías durante la noche (4°C a 10°C).

IV. HIPÓTESIS DEL TRABAJO.

La península de Baja California es el estado de la República Mexicana que presenta los valores más altos de radiación solar ($3.3-4.6 \text{ kWh/m}^2$) y altos valores de velocidad de viento ($100-250 \text{ W/m}^2$). Los recursos se encuentran disponibles para abastecer las actuales necesidades de electricidad de las comunidades rurales costeras, satisfactoriamente.

V. OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

- Evaluar el potencial de los recursos solar y eólico para su posible uso en el abastecimiento de energía eléctrica a la comunidad de Bahía de los Ángeles, Baja California.

OBJETIVOS PARTICULARES.

- Estimar la cantidad de energía eólica disponible, con base en los datos observados de velocidad de viento para la localidad de Bahía de los Ángeles.
- Calcular el potencial eólico disponible en la localidad de Bahía de los Ángeles.

- Estimar la cantidad de energía solar disponible, con base en los datos observados de radiación solar incidente en la localidad de Bahía de los Ángeles.
- Calcular la cantidad de energía que es posible producir con base en los datos de radiación solar incidente calculada para la localidad de Bahía de los Ángeles.
- Determinar los destinos finales que se están dando a la electricidad por parte de los habitantes de Bahía de los Ángeles, mediante la aplicación de entrevistas a informantes clave de la comunidad.
- Proponer una tecnología de uso adecuada para el caso de Bahía de los Ángeles, sea ésta eólica, solar o un sistema híbrido.

VI. METODOLOGÍA.

VI.1 Análisis de los datos de viento.

Los datos de velocidad del viento y de radiación solar fueron proporcionados por personal del departamento de Oceanografía Física del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE). Estos corresponden al periodo comprendido del 21 de abril de 1997 al 22 de abril de 1998, fueron registrados por una estación meteorológica AANDERAA localizada en la isla Cabeza de Caballo a una distancia aproximada de 8 millas náuticas frente a la comunidad de Bahía de los Ángeles (ver figura 4), dicha estación se encuentra a 90 m de altitud, libre de obstáculos, excepto al sureste por una colina a 50 m de distancia, (López Mariscal 2000; comunicación personal).

Los datos de velocidad del viento se encontraban registrados en sus componentes U y V, con observaciones cada hora, debido a tal arreglo se utiliza la notación indicial U_{ij} , V_{ij} utilizada por (Pavía López, 1979; Delgado–González *et al*, 1994) donde el primer subíndice representa la hora ($i = 0,1,2,3,\dots,23$) y el segundo subíndice, el día ($j = 1,2,3,\dots,30$ ó 31). La rapidez del viento se calculó de acuerdo a la ecuación.

$$W_{ij} = \sqrt{U_{ij}^2 + V_{ij}^2} \quad (1)$$

Donde U_{ij} y V_{ij} son las componentes horarias del viento. Una vez obtenida la magnitud de la velocidad del viento se calcularon promedios diarios y mensuales de la rapidez W_{ij} al igual que sus respectivas desviaciones estándar.

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_i \sqrt{U_i^2 + V_i^2} \quad (2)$$

$$W_j = \frac{1}{m} \sum_j \sqrt{U_j^2 + V_j^2} \quad (3)$$

Donde $n = 24$ hrs y $m = 28, 30$ ó 31 días.

Se calculó la distribución de probabilidades de ocurrencia para la rapidez del viento (utilizando el vector de los promedios horarios de rapidez, W_i). En el procesamiento de datos de velocidad de viento es común la utilización de la distribución de probabilidad Weibull (Pavía y O'Brien, 1996; Habali y Saleh, 1994), la distribución Weibull en otros casos se ha utilizado para el estudio del oleaje (Martínez Díaz de León y Coria Méndez, 1993).

La función de densidad Weibull también es utilizada para modelar la distribución de la duración del tiempo (tiempo hasta falla) de componentes fabricados, equipos, etc. (Mendenhall, 1991). Esta distribución está descrita por las siguientes funciones (ecuaciones 4 – 7).

$$W(x) = \beta (x / \alpha)^{\beta-1} \exp [- (x / \alpha)^\beta] / \alpha \quad \text{donde} \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (4)$$

$$W(x) = 0 \quad \text{en cualquier otro punto} \quad (5)$$

$$\mu = \beta^{1/\alpha} \Gamma [(\alpha + 1) / \alpha] \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \beta^{2/\alpha} [\Gamma \{ (\alpha + 2) / \alpha \} - \Gamma^2 \{ (\alpha + 1) / \alpha \}] \quad (7)$$

La función de densidad Weibull contiene dos parámetros, α y β . El parámetro de escala β , refleja el tamaño de las unidades en que se mide la variable aleatoria. El parámetro α es el parámetro de forma. Si se cambia el valor del parámetro α es posible generar un conjunto con una amplia variedad de curvas que modelan las distribuciones; existe una expresión de forma cerrada para su función de distribución acumulativa, la cual podemos utilizar para obtener áreas bajo la curva de Weibull.

Se calcularon los parámetros α y β para la estimación de las probabilidades de cada una de las observaciones de la rapidez media diaria del viento. Todo el procesamiento de los datos, los cálculos y gráficos fueron realizados en el programa MATLAB 5.3, asimismo, se graficaron histogramas de la rapidez del viento para visualizar su distribución y también se realizaron gráficos de promedios diarios, mensuales y horarios mostrando su desviación estándar

Con base en la distribución y probabilidad de la ocurrencia de la rapidez del viento se estimó la cantidad de energía que es posible producir (teóricamente) mediante el uso de diferentes tipos de turbinas eólicas. Esta estimación se llevó a cabo mediante el método propuesto por Habali y Saleh (1994) el cual consiste básicamente en la

multiplicación de la probabilidad de ocurrencia de una determinada marca de clase de velocidad de viento por la cantidad de energía producible por esa misma marca de clase. Dicha energía producible es obtenida de las curvas de energía calculadas por las compañías dedicadas a la venta de turbinas eólicas.

La selección del sitio para instalar una turbina eólica es de vital importancia para un mayor aprovechamiento del recurso eólico, en el océano prevalece un patrón regular del comportamiento del viento debido a la regularidad de la superficie del océano, pero cuando el viento llega a tierra ó continente este patrón pierde uniformidad, ya que el suelo actúa como un freno, por lo que se formará un gradiente de rapidez del viento y en dicho gradiente se observa que la magnitud del viento se incrementa conforme aumenta la altitud sobre la superficie (Charlier, 1993).

La energía disponible se conoce como la energía cinética del viento pasando a través del área que abarca las aspas de la turbina. Los sitios con alta velocidad de viento son los más convenientes debido a que el flujo de energía incrementa con el cubo de la velocidad del viento (Charlier, 1993).

$$P = k V^3 \quad (8)$$

Donde:

P = Potencial eólico, en $(m/s)^3$.

K = Constante.

V = Velocidad del viento, en (m/s) .

La relación del cubo de la velocidad del viento es un factor determinante en la selección del sitio, por ejemplo si encontramos un sitio donde tenemos un incremento del 10 % de la velocidad del viento con respecto a un campo determinado de velocidades obtendremos un aumento del 33 % de potencial eólico, por el contrario si tenemos un sitio donde la velocidad del viento decrece el mismo 10 %, el potencial eólico disminuirá un 27 %. Del recurso eólico sólo podemos extraer el 20 % de la energía disponible para convertirla en energía eléctrica. La energía contenida en los vientos en mar abierto excede por mucho a la energía contenida en los vientos cercanos a la costa, no importa la estación del año (Charlier, 1993).

El cubo del promedio de la velocidad del viento indica la cantidad de energía que puede ser extraída, por año, por metro cuadrado, y puede ser calculada de la siguiente manera.

$$V^3 = \int_0^{\infty} V^3 P(V) dv \quad (9)$$

Donde:

V = Velocidad del viento.

P (V) = Distribución de Frecuencias de la velocidad del viento.

Si la distribución de probabilidad de la velocidad del viento no es conocida, pero la serie de tiempo V(t) para $(0 \leq t \leq T)$, donde T es t = un año; está disponible, entonces podemos utilizar la siguiente ecuación:

$$V^3 = \int_0^{\infty} [V(t)]^3 dt \quad (10)$$

VI. 2 Análisis de los datos de radiación solar.

Los datos de radiación solar registrados por la estación meteorológica AANDERAA están en unidades de Watts/m^2 , en intervalos de medición de cada media hora. Se calcularon promedios diarios, promedios mensuales y promedios horarios para cada estación del año y también parámetros estadísticos generales (desviación estándar, varianza, mínimos y máximos). Cabe destacar que los promedios diarios y mensuales se realizaron tomando únicamente 12 horas del día, de las 6:00 a las 18:00 horas, debido a que no tiene ningún caso considerar el periodo nocturno.

Se procesó la serie de tiempo de radiación solar incidente o de onda corta y se construyeron gráficos de promedios diarios y mensuales. Por otro lado se calculó la radiación solar mensual utilizando un código de programación “*Radoncur*” (Castro *et al*, 1994) escrito en Fortran. Dicho programa necesita como datos de entrada la latitud de la zona de estudio y la cobertura de nubes en décimos. La cobertura de nubes en décimos no está disponible para los años de 1997 y 1998, por lo que se utilizaron mapas de promedios mensuales de cobertura por nubes a escala mundial en un periodo de 10 años de 1971 a 1981; estos mapas fueron preparados por el *Departamento de Energía de los Estados Unidos de América*.

Se calculó la radiación solar para la cobertura de nubes en tierra y en mar, y se graficaron los promedios mensuales calculados para la zona de estudio.

VI.3 Análisis de la comunidad.

Debido a que el presente estudio está enfocado a evaluar los recursos renovables (solar y eólico) y su factibilidad de uso para la satisfacción de las necesidades energéticas de una comunidad rural no electrificada, se torna imperante la necesidad de incluir un análisis de la comunidad, de sus necesidades de energía y de los usos finales de la misma.

La herramienta que se utilizó fue la entrevista a informantes claves de la comunidad de Bahía de los Ángeles. Uno de los principales beneficios de hacer uso de datos cualitativos, es que se enfocan a los eventos ordinarios o cotidianos que experimentan los habitantes de una comunidad y que reflejan de cierta manera la realidad que impera en torno al rubro energético (Miles y Huberman, 1994), ya que los actores entrevistados son en sí los que participan o deben participar en tomar las decisiones para resolver la problemática del abastecimiento energético. Sin embargo, es importante señalar las desventajas de las entrevistas, ya que hay que considerar que los datos que se recolectan en ellas provienen de enunciados verbales que están sujetos a exageraciones, distorsiones, engaños, lo que se puede traducir en una discrepancia entre lo que dicen y lo que realmente viven (Taylor, 1998).

Para el presente estudio se entrevistaron a los informantes clave con la finalidad de obtener información para la selección o propuesta de un determinado tipo de tecnología que satisfaga lo mejor posible las necesidades energéticas de la comunidad en general, así como también los gustos y preferencias de la población. Esta parte del estudio es una herramienta indispensable para una adecuada toma de decisiones ya que

se puede proponer desde nuestro punto de vista, una excelente solución, pero si los usuarios del sistema tecnológico no fueron partícipes en la toma de decisiones para la adopción de un sistema alternativo en específico, entonces existirá una fractura entre la instalación y el mantenimiento del sistema como ha sucedido en numerosas ocasiones, donde los usuarios pierden el interés o la motivación de sostener el sistema debido a la falta de capacitación, a fallas que se puedan suscitar ó simplemente debido a la desaprobación del sistema en cuestión.

Las entrevistas personalizadas se llevaron a cabo de manera verbal a los informantes claves de la comunidad, el formato de la entrevista se encuentra en el apéndice A. No se eligió un número determinado de muestra para la comunidad, se decidió entrevistar a las personas que desempeñan un papel importante en la comunidad y que pudiera ser representativo para el resto de los habitantes. Para tal fin se eligieron grupos que incluyeran: amas de casa, personas involucradas con las principales actividades que se llevan a cabo en la comunidad (comerciantes, hoteleros, constructores, pescadores, prestadores de servicios etc.), personas con autoridad (ejidatarios y comisariato ejidal) y actuales usuarios de energías alternas.

VII. RESULTADOS.

VII.1 Recurso Eólico.

La rapidez media del viento fue de 5.4 m/s. El viento en la localidad de Bahía de los Ángeles presentó una gran variabilidad diaria para todo el periodo de mediciones, sin embargo, los meses correspondientes a la estación del verano presentan una menor variabilidad, en contraste con los meses correspondientes a la estación invernal donde las variaciones son más amplias (ver figura 5).

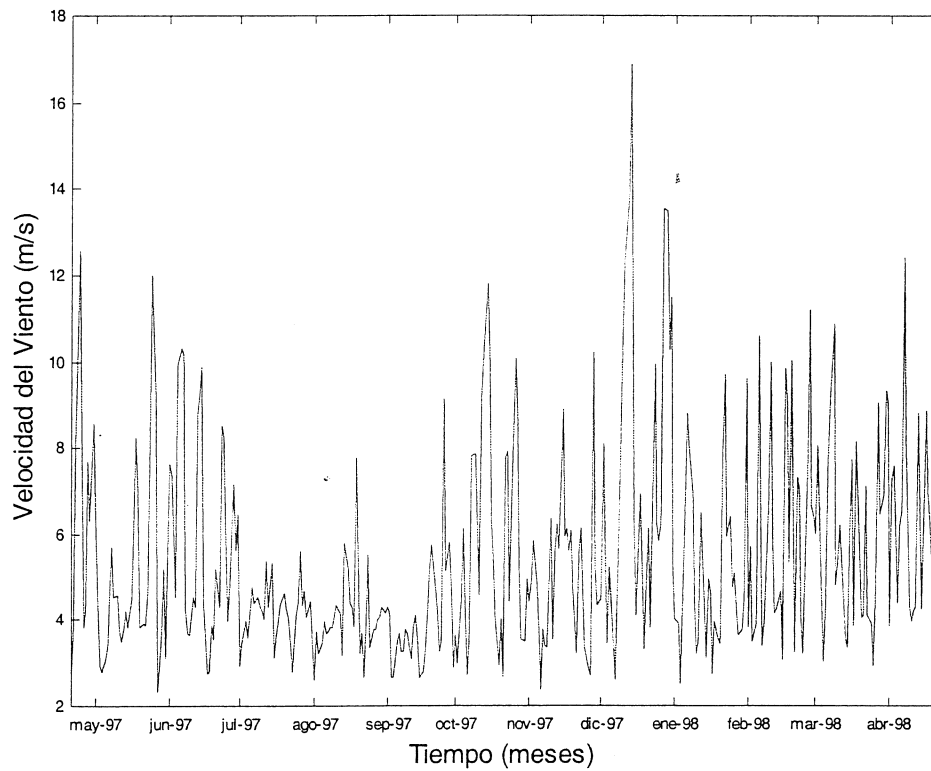


Figura 5. Promedios diarios de rapidez del viento.

Se promediaron las variaciones diarias con la finalidad de obtener un valor representativo para cada mes. Se encontró que los promedios mensuales presentan una desviación estándar considerable indicativa de la gran variabilidad diaria del viento mencionada con anterioridad (ver figura 6). Cabe resaltar que el mes de diciembre presenta el promedio más alto pero también la variabilidad es muy grande; el mes de septiembre presenta el promedio más bajo y en el mes de julio se presenta variabilidad más baja y uno de los promedios más bajos.

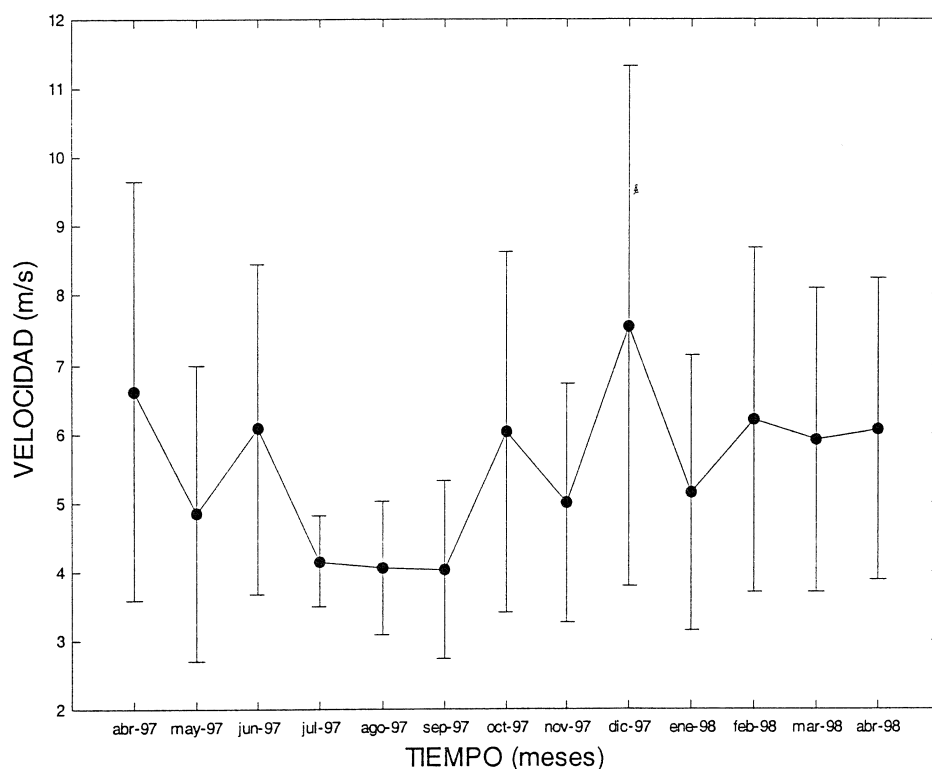


Figura 6. Promedios mensuales de rapidez de viento, presentados con su respectiva desviación estándar.

Se ajustó la función de distribución de probabilidades Weibull a los datos, y se observa un buen ajuste. La línea recta representa la función Weibull en una escala semilogarítmica en el eje X; podemos observar que la línea más ancha que son las observaciones horarias de rapidez de viento sigue a la función Weibull (ver figura 7).

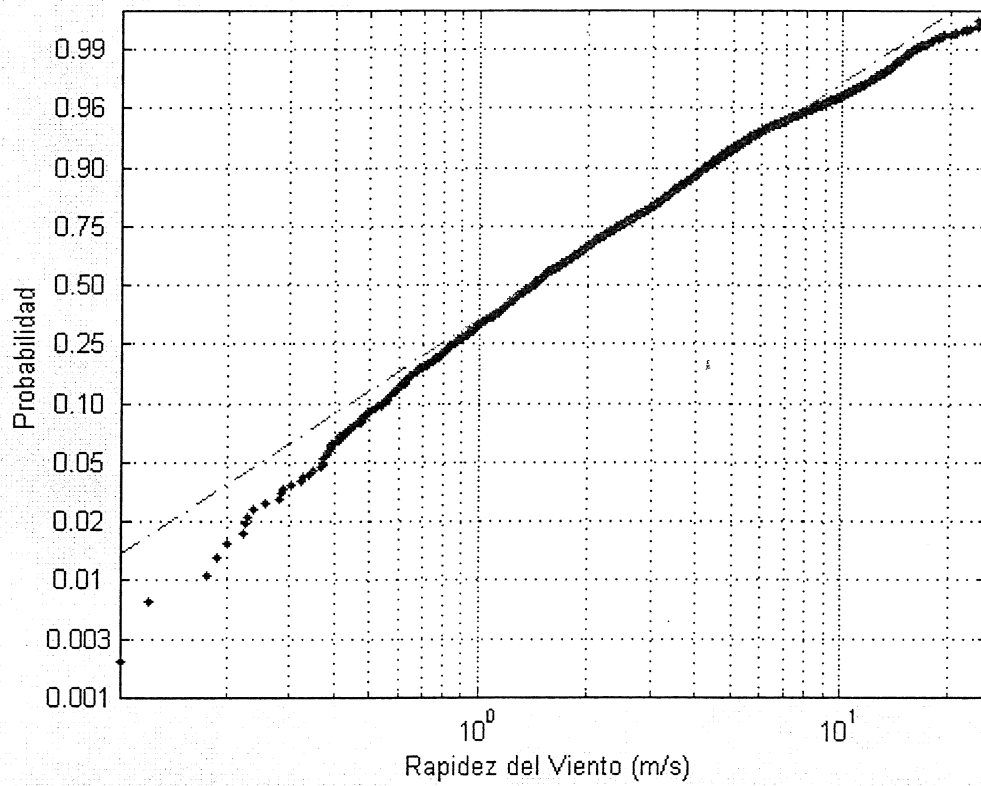


Figura 7. Gráfico de probabilidad Weibull para la rapidez del viento.

A continuación se muestran las características básicas de la serie de datos observados de viento; el 75 % de los datos se encuentran entre los 3 y los 7 m/s, mientras que el 25 % restante se encuentra fuera de este rango de velocidades con una mayor dispersión de datos hacia las velocidades más altas (mayores a 7 m/s), y una menor dispersión hacia las velocidades más bajas de 3 m/s (ver figura 8). La velocidad más alta es de ~ 25 m/s y la más baja es de ~ 0.1 m. La mediana de los datos es de 4.6 m/s. Estas son características típicas de una distribución Weibull.

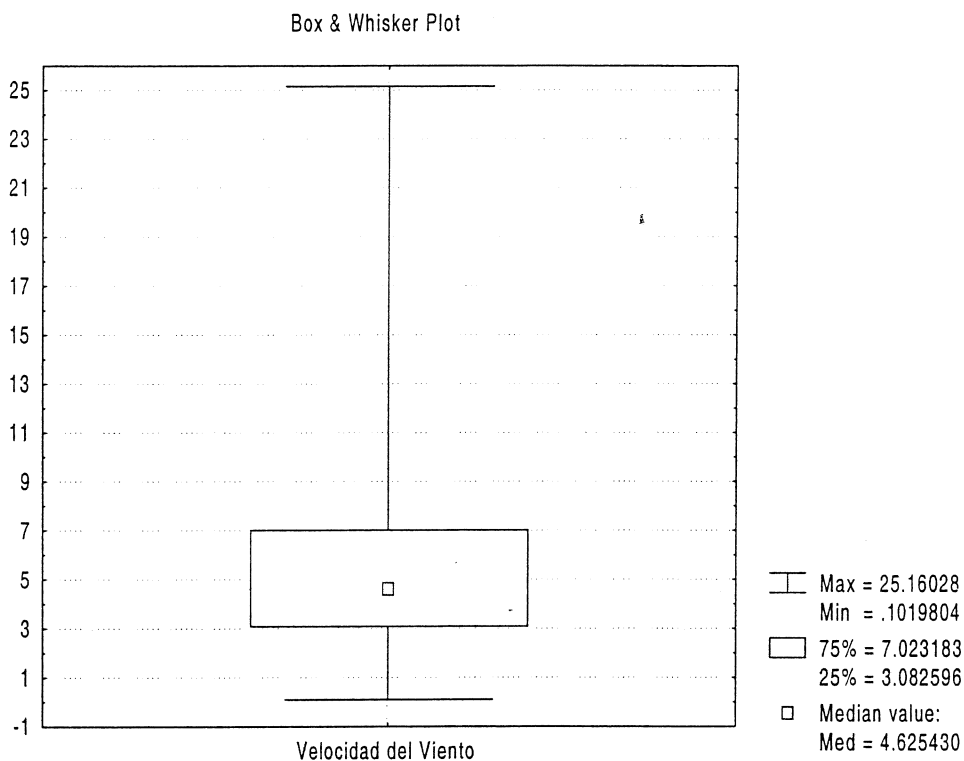


Figura 8. Características básicas de los datos observados de viento.

Los promedios horarios del recurso eólico para todo el periodo de mediciones se muestran en la figura 9 (b), podemos observar que la magnitud del viento se incrementa en las noches, aproximadamente de las 18:00 horas a las 00:00 horas y precisamente estas horas son las que representan el horario de mayor utilización de energía eléctrica (horario pico). Sin embargo podemos ver en la figura 9 (a) que los promedios horarios presentan una gran variabilidad para todas las horas del día.

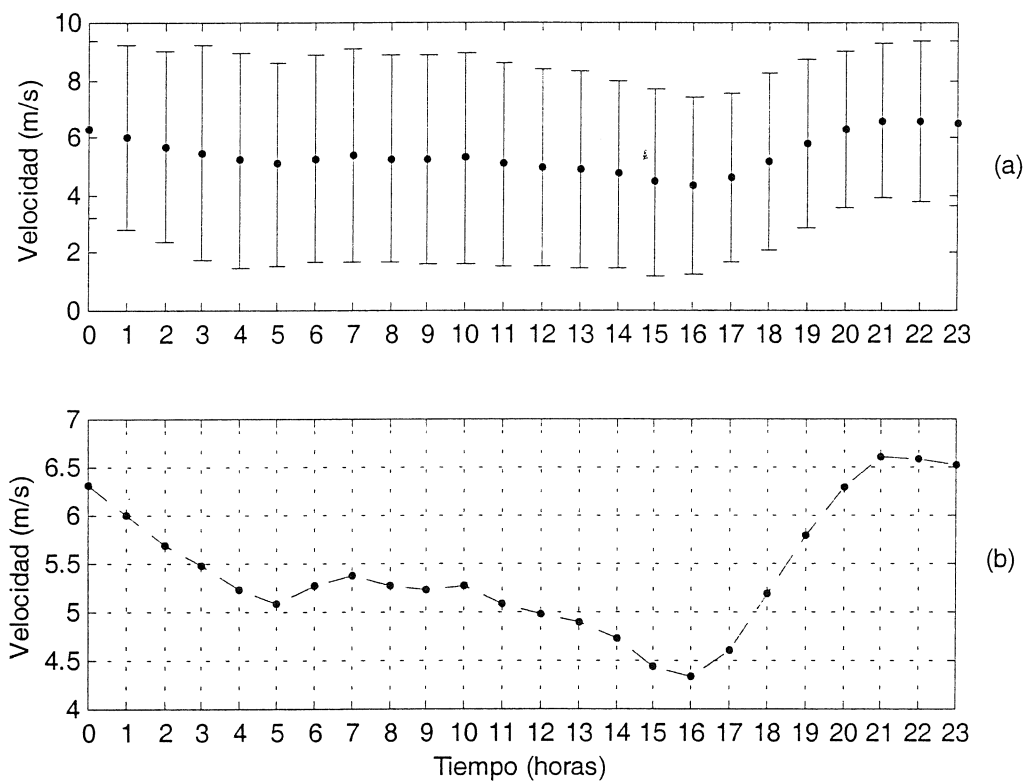


Figura 9 (a). Desviación estándar horaria de la rapidez del viento.

Figura 9 (b). Promedio horario de la rapidez del viento.

La tabla I muestra la estadística general de la serie de datos del viento obtenida con la función de distribución de probabilidad Weibull. Los valores de los parámetros α y β son el mejor ajuste para los datos y sus intervalos de confianza están dados con un intervalo de confianza del 95 % (ver tabla I).

Tabla I. Estadística General de la serie de tiempo de rapidez de viento, obtenida con el modelo Weibull.

Número de datos utilizados	8808
Media	5.4 (m/s)
Mediana	4.6 (m/s)
Varianza σ^2	10.8
Potencial Eólico Calculado utilizando la fórmula (9, VI.1)	365.27 (m/s) ³
Potencial Eólico Calculado utilizando la fórmula (10, VI.1)	387.18 (m/s) ³
Parámetro α	0.04584
Parámetro β	1.7039
Límites inferior y superior del intervalo de Confianza para α	0.044945-0.046734
Límites inferior y superior del intervalo de Confianza para β	1.6741-1.7336

VII.2 Recurso Solar.

A continuación de igual manera como se hizo con el recurso eólico se mostrarán las características estadísticas más relevantes de las observaciones de radiación solar en la localidad de Bahía de los Ángeles

La variabilidad diaria del recurso solar es menor en comparación con la variabilidad del recurso eólico, sin embargo, a lo largo de todo el periodo de mediciones se observan regularmente días que presentan una disminución de la radiación, lo que puede ser atribuido a una alta nubosidad. La siguiente figura 10 muestra el comportamiento diario de la radiación solar incidente.

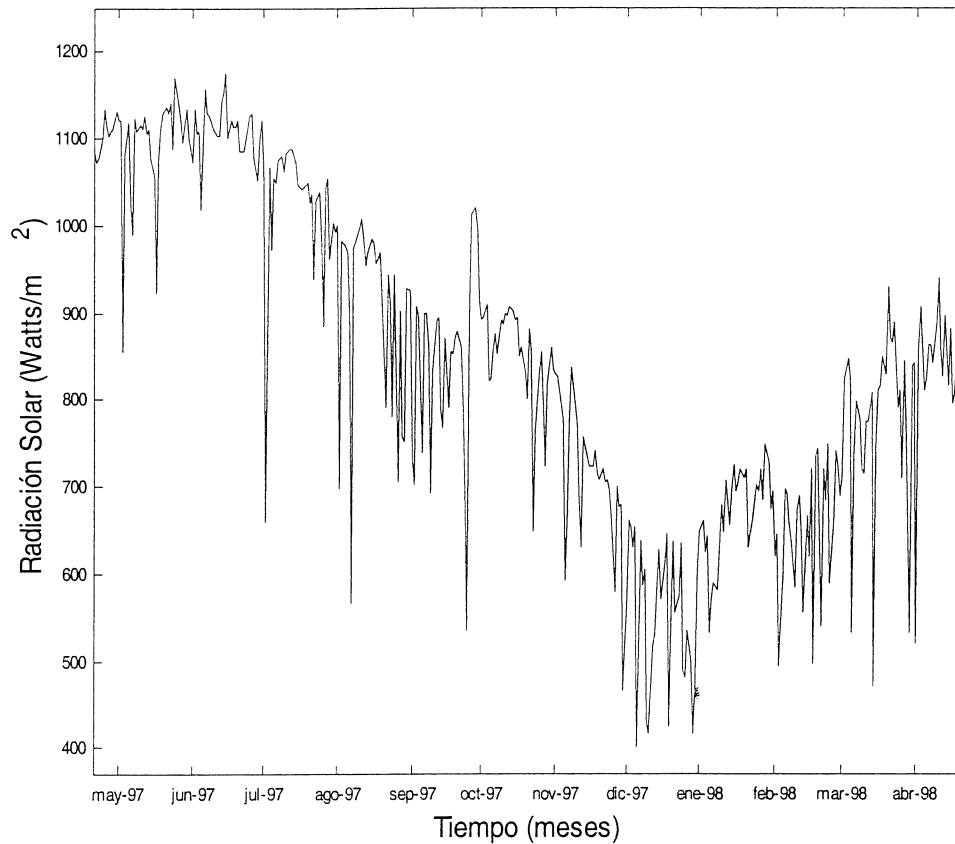


Figura 10. Promedios diarios de Radiación Solar Incidente.

Se obtuvo un valor representativo mensual, con base en los datos de radiación promedio diaria; esto se hizo para la serie de tiempo de radiación solar incidente y para la radiación solar neta. Promediando las variaciones diarias se observa un comportamiento estacional más claro de la radiación solar incidente, donde en primavera se presentan los valores más altos de radiación, en invierno se presentan los más bajos y las estaciones de otoño y verano se pueden considerar estaciones de transición (ver figura 11).

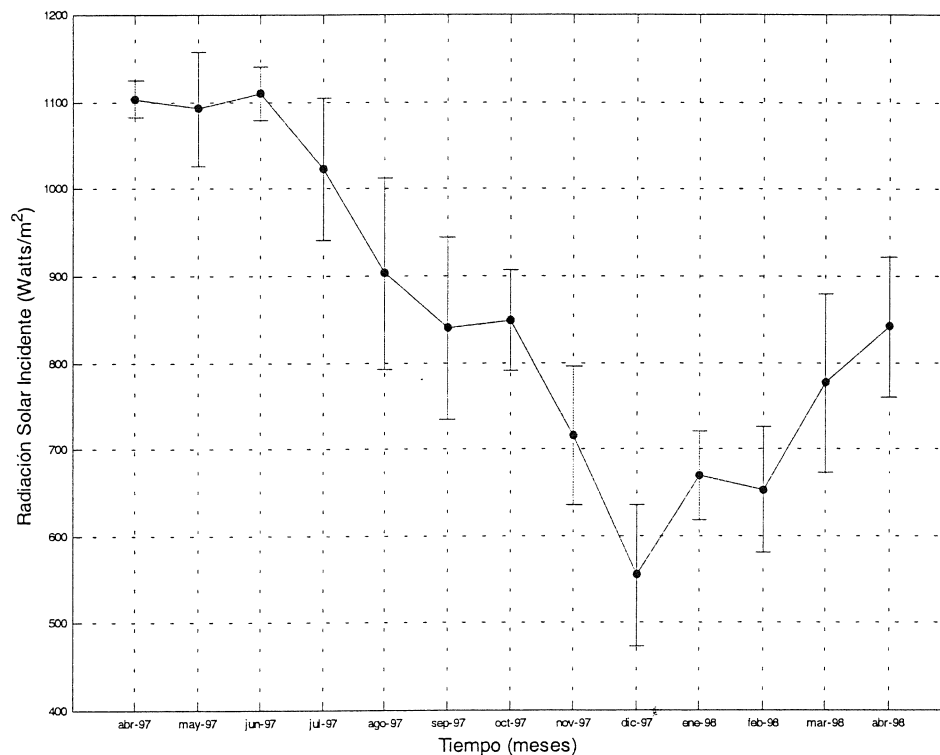


Figura 11. Promedios mensuales de radiación incidente presentados con su respectiva desviación estándar.

Para calcular la radiación de la zona de interés fue necesario obtener un porcentaje de cobertura de nubes, como se describió en la sección de metodología. Estos datos de cobertura de nubes son más altos para la zona marítima que para la zona terrestre, por lo que la radiación calculada para el mar es menor a la calculada en tierra. La razón para calcular la radiación para ambas zonas es debido a que la estación meteorológica AANDERAA se encuentra localizada en la Isla Cola de Caballo que se encuentra en la zona marítima y se requiere comparar los datos calculados con los

observados, sin embargo, la localidad de interés se encuentra evidentemente en la zona terrestre donde posiblemente se podrían instalar los sistemas fotovoltaicos.

Los promedios mensuales calculados de radiación solar en tierra oscilan entre los 130 - 330 Watts/m². Para la zona marítima los promedios mensuales oscilan entre los 120 – 260 Watts/m². De manera similar que en los datos observados el mes de junio presenta el promedio más elevado y para el mes de diciembre se presenta el promedio más bajo de radiación (ver figura 12).

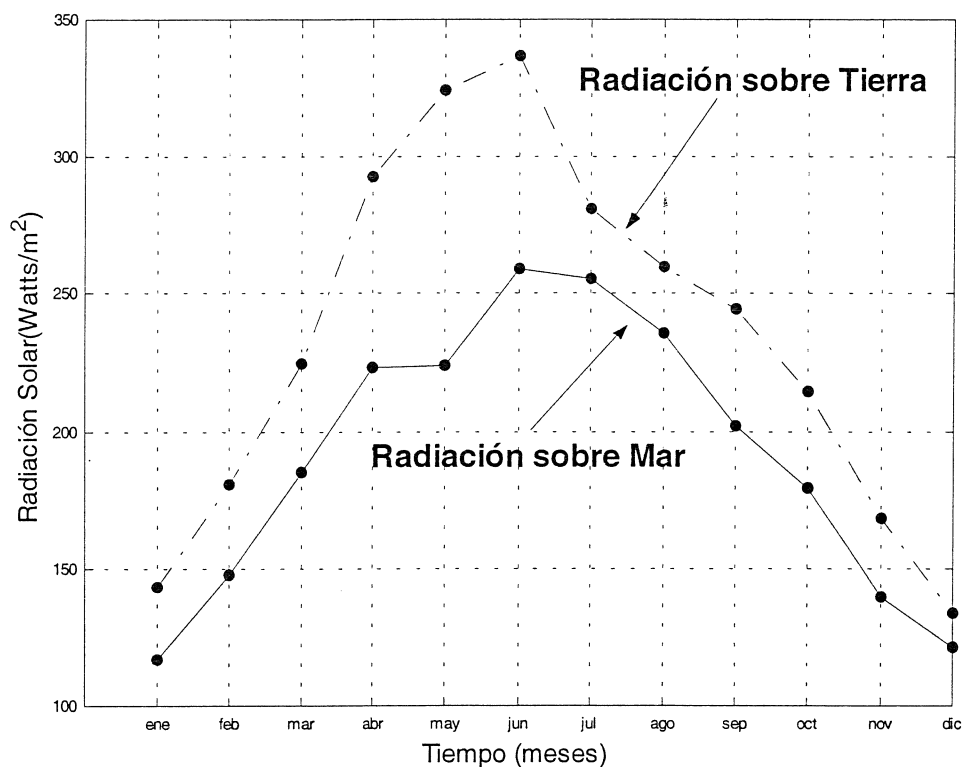


Figura 12. Radiación incidente calculada para la zona marítima y terrestre de Bahía de los Ángeles.

La figura 13 (a) y (b) nos muestra el comportamiento horario de la radiación solar incidente para la primavera y el invierno de 1997 respectivamente. Se puede observar una mayor variabilidad del recurso en invierno que en primavera, también vemos que los valores de radiación son más altos en primavera; para las 12:00 horas del día la radiación promedio en primavera es de $\sim 1650 \text{ Watts/m}^2$ y de $\sim 1050 \text{ Watts/m}^2$ para el invierno.

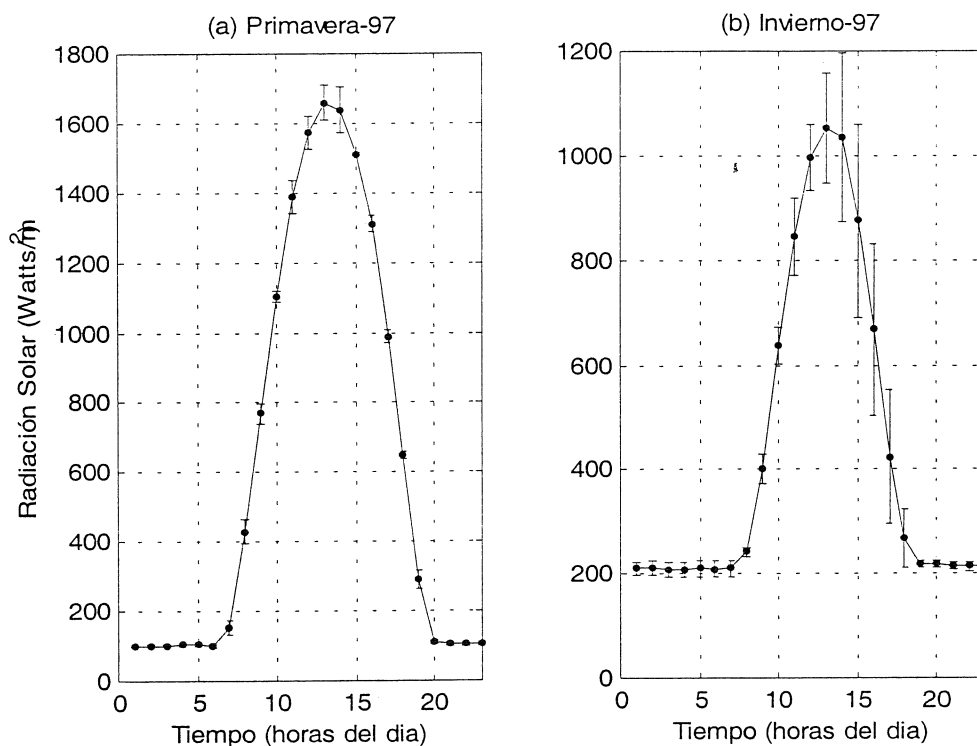


Figura 13 (a). Radiación solar incidente promedio horaria para la primavera de 1997.

Figura 13 (b). Radiación solar incidente promedio horaria para el invierno de 1997.

La figura 14 muestra los promedios mensuales de radiación incidente y rapidez de viento. Para la estación de invierno se puede observar que el recurso eólico aumenta y el recurso solar disminuye, especialmente en el mes de diciembre, para los meses de julio, agosto y septiembre tenemos las velocidades más bajas mientras se observa una alta radiación incidente de 850 - 1000 Watts/m².

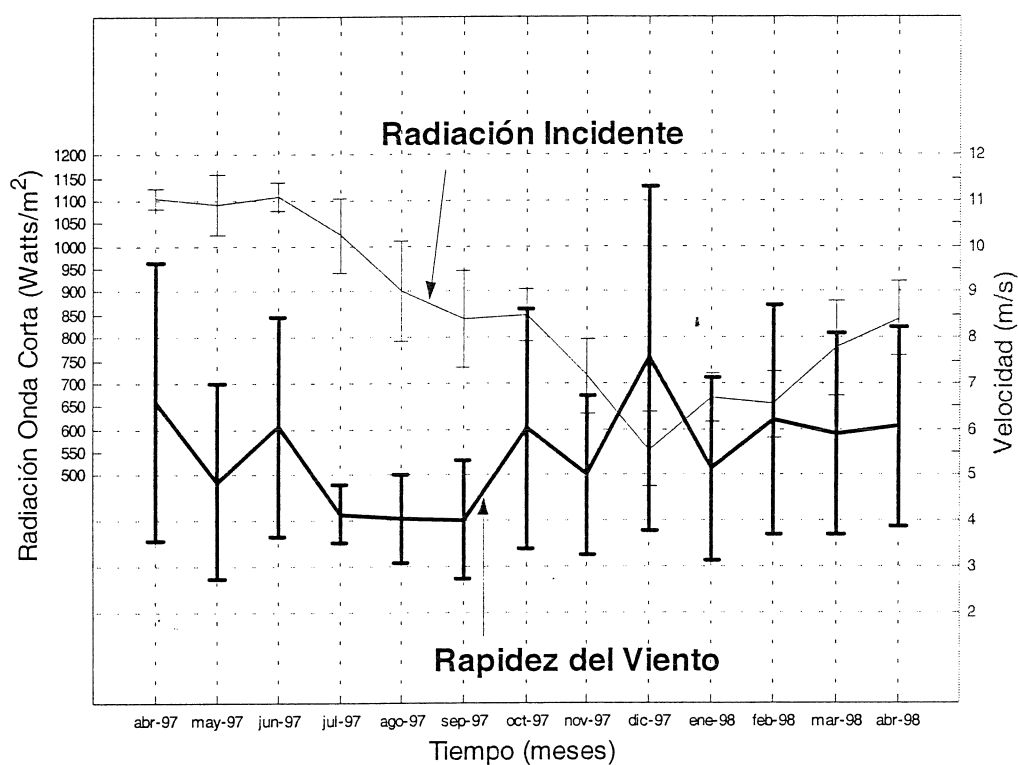


Figura 14. Comparación de los promedios mensuales de radiación incidente y de rapidez del viento.

VII.3 Tecnologías.

VII.3a Turbinas Eólicas.

Una vez que se obtuvo la estadística básica de las observaciones de rapidez de viento, se calculó la energía que es posible producir con base en curvas de energía proporcionadas por las compañías fabricantes.

A continuación se muestra una tabla con los cuatro tipos de turbinas que se consideraron para calcular la energía que puede ser producida con las observaciones de rapidez del viento observados en la localidad.

Tabla II. Turbinas eólicas consideradas para calcular la energía producible.

Modelo de la turbina	Turbina BWC – EXCEL	Turbina LW Model 10 kW	Turbina STD Model 10 Kw	Turbina WT-6000
Nombre de la Compañía	Bergey Windpower Co. (BWC)	G.P & G.F. Hill Pty. Ltd.	G.P & G.F. Hill Pty. Ltd.	Proven Engineering Products
País de origen	E.U.A	Australia	Australia	Escocia

La figura 15 muestra las curvas de energía de las cuatro turbinas, las turbinas que presentan un mejor rendimiento son la BWC-EXCEL de la compañía *Bergey Windpower Co.* y la STD Model 10 kW de la compañía *G.P & G.F. Hill Pty. Ltd.* Cabe destacar que para la marca de clase de 9 m/s se observa la mayor cantidad de energía que se puede producir por las cuatro turbinas.

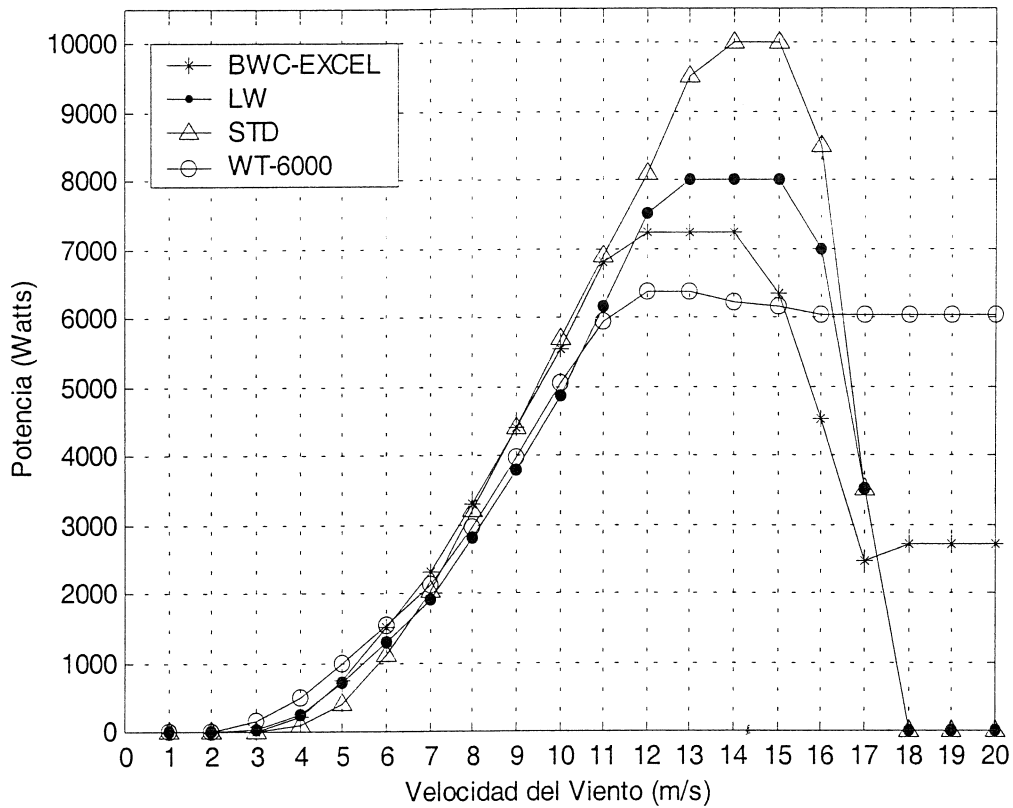


Figura 15. Curvas de energía de los cuatro tipos de turbinas, proporcionadas por la compañías fabricantes.

Calculando la energía disponible con base en los datos observados de rapidez de viento y en las curvas de energía, se observa que las turbinas que brindan el mejor rendimiento son la STD Model 10 kW de la compañía *G.P & G.F. Hill Pty. Ltd.* y la turbina BWC-EXCEL de la compañía *Bergey Windpower Co.* en contraste con la turbina LW de la compañía *G.P & G.F. Hill Pty. Ltd.* que ofrece el menor rendimiento (ver figura 16).

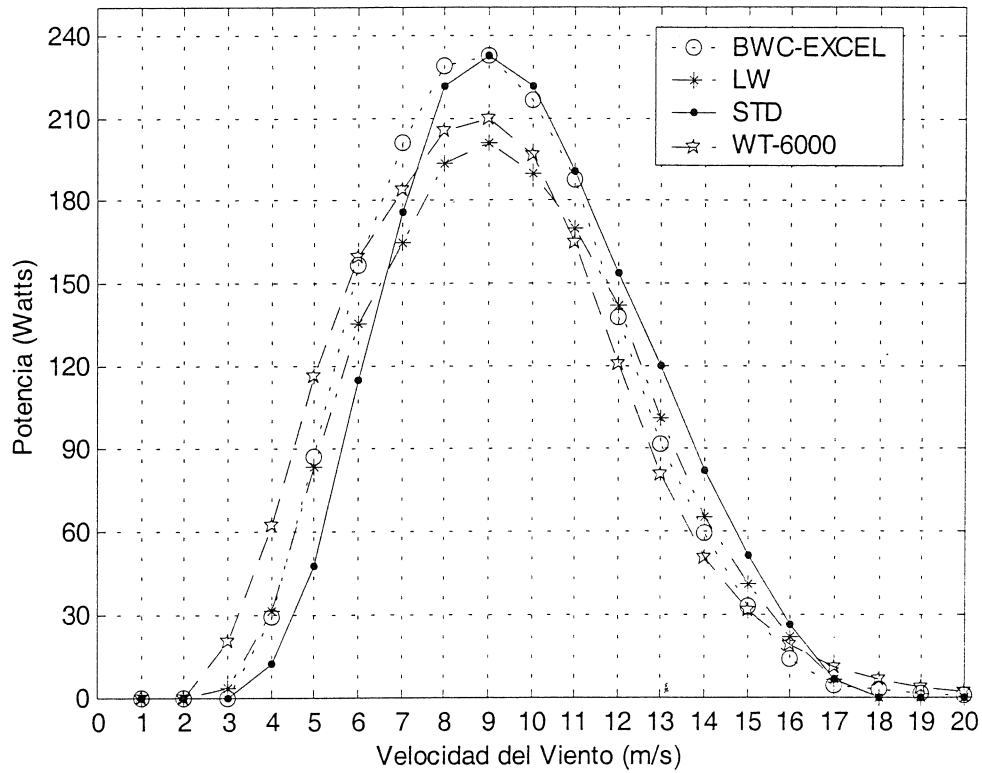


Figura 16. Energía producida por los cuatro tipos de turbina, con base en los datos observados de rapidez de viento.

La energía que se puede producir teóricamente integrada a diferentes intervalos de tiempo para los cuatro modelos de turbinas se muestra en la tabla III, podemos ver que la turbina que ofrece el rendimiento más alto es la BWC-EXCEL de la compañía *Bergey Windpower Company*.

Tabla III. Energía producible por los cuatro modelos de turbinas.

Modelo de Turbina	Turbina BWC – EXCEL	Turbina LW Model 10 kW	Turbina STD Model 10 kW	Turbina WT-6000
Compañía	Bergey Windpower Co. (BWC)	G.P & G.F. Hill Pty. Ltd.	G.P & G.F. Hill Pty. Ltd.	Proven Engineering Products
Potencia de Salida Promedio (Watts)	1,685	1,553	1,659	1,646
Energía de Salida Diaria (kW hr)	40	37	40	39
Energía de Salida Anual (kW hr)	14,764	13,608	14,530	14,415
Energía de Salida Mensual (kW hr)	1,230	1,134	1,211	1,201

VII.3b Celdas Fotovoltaicas.

La cantidad de energía eléctrica que es posible producir a partir de la energía solar depende de la eficiencia de las tecnologías fotovoltaicas, y del área que cubren las celdas instaladas principalmente. La eficiencia puede ser expresada como un cociente entre la potencia de salida y la potencia de entrada a la celda fotovoltaica. El NREL ha realizado pruebas para medir dicha eficiencia. Estas mediciones de eficiencia se realizan bajo una radiación estándar de 1000 Watts/m², debido a que en una área típica de la Tierra esta cantidad de radiación es disponible para la conversión en potencia eléctrica al medio día, (NREL, 2001).

El NREL concluyó que las tecnologías que ofrece una máxima eficiencia son los sistemas fotovoltaicos de silicio cristalino con un 23 % de eficiencia, si se utilizan lentes para concentrar la radiación, la eficiencia puede aumentar hasta un 29-30%.

Los sistemas fotovoltaicos de silicio policristalino tienen una eficiencia de aproximadamente 18 %, los sistemas de silicio amorfo tienen una eficiencia de 12 %. A continuación se muestra una tabla con algunos sistemas fotovoltaicos de diferentes compañías, con sus respectivas características.

Tabla IV. Sistemas Fotovoltaicos.

Modelo	PV65	CANROM-75	SR-90	SP-140
Compañía	Kyocera	Canrom Photovoltaics	Siemens Solar	Siemens Solar
Fabricante	Solar Inc	Inc.	Industries	Industries
Potencia de salida (Watts)	65	75	90	140
Eficiencia (%)	14	10	10	10

Actualmente existe una amplia variedad de modelos de sistemas fotovoltaicos especializados para solucionar diferentes problemas determinados, como el bombeo de agua, la iluminación habitacional, la alimentación de casas móviles y *campers*, el suministro de energía a comunidades remotas, hasta programas de índole estatal o nacional para la interconexión de la red eléctrica con sistemas fotovoltaicos para una mayor producción de energía. Por tal motivo en este trabajo se estimó la energía producible con base en los datos observados y calculados suponiendo la utilización de sistemas fotovoltaicos de silicio cristalino, es decir utilizando la clasificación más general en cuanto a tipos de tecnologías se refiere ya que no es muy útil hacer una separación y clasificación más detallada porque las características y rendimientos de un sistema fotovoltaico determinado de diferentes compañías realmente no varían considerablemente. Se consideraron los sistemas fotovoltaicos de silicio cristalino por presentar la mayor eficiencia según el NREL.

Tabla V. Energía producible con base en el recurso solar.

		Radiación Promedio Mensual Junio-97	Radiación Promedio Mensual Diciembre-97	Radiación Calculada Junio	Radiación Calculada Diciembre
Radiación (Watts/m ²).	Promedio	1,110	555	336	133
Potencia de Salida Promedio (Watts/m ²), tomando 30% eficiencia.		255.3	127.6	77	30.6
Energía de Salida Diaria (kW hr/m ²).		6	3	1.8	0.73
Energía de Salida Mensual (kW hr/m ²).		180	90	54	22

La tabla V muestra la cantidad de energía que se puede producir mensualmente con base en los promedios mensuales de radiación solar incidente de junio-97 y diciembre-97, así como también para los promedios de junio y diciembre de radiación calculada. En la tabla sólo se muestran la energía producible de junio por ser el valor más alto y de diciembre por ser el valor más bajo. Por otro lado la energía que es posible producir con base en los datos observados es más elevada que la energía producible con base en los datos calculados.

La figura 17 muestra la cantidad de energía mensual que se puede producir a lo largo del año de mediciones. Se puede observar que en los meses de primavera y verano se puede producir casi el doble de la energía que se puede producir en los meses de invierno, tomando en consideración el uso de sistemas fotovoltaicos de silicio cristalino que tienen una eficiencia del 23 %.

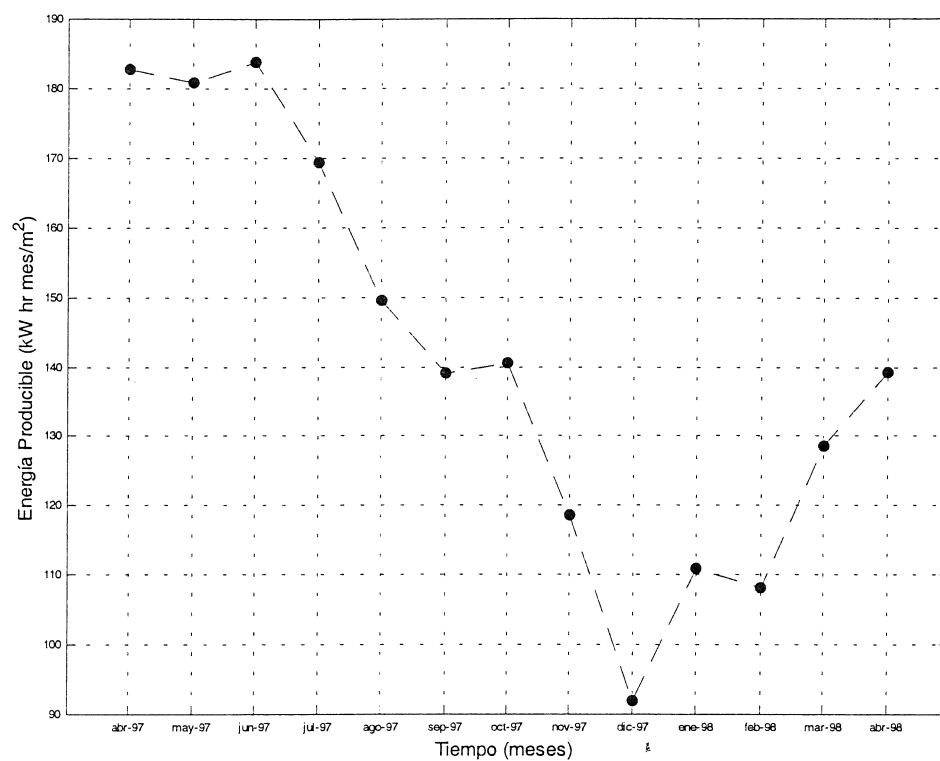


Figura 17. Energía mensual producible con base en la radiación incidente observada.

VII.4 Resultados del Análisis a la Comunidad.

Se realizaron entrevistas a los habitantes de Bahía de los Ángeles que desempeñan las actividades más representativas en la comunidad, por citar algunos ejemplos, a prestadores de servicios, personas dedicadas al comercio, personas con autoridad en la comunidad, amas de casa, personas que actualmente hacen uso de energías alternativas, entre otros, no se estableció un número determinado de entrevistados ya que este tipo de estudio no lo requiere, por ser un estudio de tipo cualitativo, no cuantitativo (Taylor, 1998). La información más sobresaliente obtenida de las entrevistas se menciona a continuación.

Las entrevistas revelan un promedio de 4 a 5 habitantes por casa habitación; las principales actividades económicas que se realizan en la comunidad según las encuestas son la pesca y el turismo y en menor grado el comercio y la prestación de servicios.

El costo de la electricidad en la comunidad de Bahía de los Ángeles es muy elevado. En el presente éste es casi tres veces más alto que en una localidad que se encuentra electrificada por la red nacional (\$1.3 pesos el Kw). En Bahía de los Angeles el precio de un Kilowatt es en promedio de \$3.1 pesos para uso doméstico y de \$3.6 para otros usos (principalmente turístico).

En promedio una familia consume entre \$200 y \$400 pesos mensuales por el servicio de electricidad, lo que se traduce en un consumo de 64 a 129 kW hr mensuales respectivamente, pero existen casos en los que se registró un gasto de hasta \$800 pesos mensuales por casa habitación, esto representa un consumo de 258 kW hr por mes.

Los principales usos de la energía eléctrica son la iluminación de casas habitación, la alimentación de aparatos electrodomésticos (principalmente refrigeradores, televisores, ventiladores, radios, lavadoras, licuadoras).

Por otro lado, algunos hoteles de la comunidad tienen motogeneradores propios debido a un gasto energético mayor que tienen que cubrir, éstos hoteles tienen un gasto promedio mensual que va de los \$4000 a los \$5000 pesos, lo que se traduce en un consumo de 1290 a 1615 kW respectivamente, cabe destacar que estos consumos presentan sus máximos en la época de verano.

Existen pocos habitantes (alrededor del 5 %) que hacen uso de energías alternas, especialmente de la energía solar, dichos habitantes generalmente no están conectados al motogenerador comunitario.

Otro aspecto importante que los entrevistados externaron es su preferencia por instalar sistemas unifamiliares, ya sean sistemas eólicos o solares, y esto principalmente debido al temor que existe de enfrentar una fuerte inversión económica para montar un sistema comunitario. Aunque cabe destacar que en otras partes del mundo los sistemas comunitarios han demostrado ser una excelente solución al suministro de electricidad, y aunque el costo inicial de instalación es muy elevado, con el tiempo, la recuperación de la inversión y el ahorro de recursos económicos y energéticos supera el costo de la inversión inicial.

Los informantes claves de la comunidad de Bahía de los Ángeles mostraron su inconformidad al usar y pagar el sistema de generación de electricidad por medio del

motogenerador diesel, principalmente por el costo tan elevado que representa y por las constantes fallas del generador.

Por otro lado en las entrevistas que se les practicó dejaron clara su preferencia por la utilización de energías alternativas y en general están de acuerdo en invertir parcialmente en la instalación de sistemas unifamiliares, ya sean fotovoltaicos o eólicos.

VIII. DISCUSIONES.

En el Norte del Golfo de California predominan dos estaciones climáticas: el invierno de latitudes medias y el verano subtropical. La estación invernal se caracteriza por su aire seco y descendiente, el cielo generalmente sin nubosidad. El patrón del gradiente de presión superficial genera vientos que soplan a lo largo del Golfo de California de norte a sur, con una intensidad que oscila entre los 8 m/s hasta los 12 m/s y las condiciones son muy estables (Badan y Dorman, 1991).

En el verano el gradiente de presión superficial invierte su dirección hacia el norte ocasionando que el patrón del viento también se invierta y el viento sople de sur a norte. Las condiciones del campo de presión en verano ocasionan que los vientos superficiales tengan una media fluctuando cerca del cero, (Badan y Dorman, 1991).

El periodo de mediciones analizado (abril-1997 a abril-1998) comprende las anomalías del fenómeno de El Niño (EN) 1997-98, para la zona de Golfo de California (Palacios-Hernández *et al.*, 2001), para este periodo se presentó una desviación de casi 4° C del comportamiento climatológico estacional. El calentamiento anómalo en el este del Océano Pacífico causa anomalías dentro del Golfo de California, especialmente en el norte del Golfo, esto debido a procesos locales, (Palacios-Hernández *et al.*, 2001).

Se reporta una anomalía positiva en la temperatura superficial del mar para el periodo EN/1997-98, (Lluch-Cota *et al.*, 1999); y este periodo fue el más húmedo (seco) de la década de los 90's en el sur (norte) de la Península de Baja California, (Delgadillo-Macías *et al.*, 1999).

Estas anomalías reportadas para el Norte del Golfo de California afectan las condiciones meteorológicas de la zona, (Palacios-Hernández *et al.*, 2001) incluyendo los patrones de viento. Desafortunadamente no se cuentan con bancos de datos de viento (tomados *in situ*) para analizar la afectación de El Niño en los patrones de viento de la localidad de Bahía de los Ángeles.

El análisis de los datos observados de rapidez de viento en este trabajo muestra que para la estación invernal la rapidez promedio es de 6.2 m/s y para la estación del verano el promedio es de 4.7 m/s, comparando estos resultados con los datos reportados por Badan y Dorman (1991) se podría suponer la subestimación del recurso eólico en la estación invernal y la sobrestimación del recurso en la estación de verano, debido a las anomalías de El Niño 1997-98.

Sin embargo el NREL reporta que una velocidad de 4.9 – 6.7 m/s puede producir una potencia de 150 - 250 Watts/m² por lo que el recurso eólico en la localidad de Bahía de los Ángeles es considerado “**bueno**” para cubrir las necesidades energéticas de la comunidad (ver figura 3). Por otro lado el *U.S Department of Energy* (US-DEO) reporta que para una velocidad de 5.6 m/s se pueden generar 200 Watts/m², (US-DEO, 2001). Quintanilla-Montoya (1999) reporta que para un promedio de velocidad anual de 5.5 m/s, suponiendo que el recurso se encuentre disponible el 70 % del año y que las aspas de la turbina abarcaran un diámetro de 7 m se generarían 129 kWh/mes, y utilizando diámetros de aspas de 14 y 20 m, obtendríamos una generación de 643 kWh/mes y 1,574 kWh/mes, respectivamente. Si tomamos en consideración el último

dato reportado por Quintanilla (1,574 kWh/mes) es muy similar a los datos de energía producible obtenidos en este trabajo (ver tabla III).

Con respecto al recurso solar, las anomalías de El Niño podrían provocar un aumento o disminución de la nubosidad, y afectar la estimación del recurso. Si es el primer caso, el recurso solar para el periodo de estudio estaría siendo subestimado, lo cual es poco probable ya que se tienen promedios mensuales de radiación incidente elevados, que oscilan entre los 500 Watts/m² en invierno hasta más de 1000 Watts/m² en verano (ver figura 11). Estos valores de radiación incidente observados están por encima de los valores de radiación de onda corta calculados (ver figura 12). Cabe destacar que para calcular la radiación se utilizaron porcentajes de cobertura de nubes, los cuales oscilan entre el 30 % y el 50 %. En el caso de una disminución de la nubosidad se estaría sobrestimando el recurso, pero existen referencias de que se tiene un gran potencial solar explotable en la Península de Baja California; por ejemplo se reporta un potencial de 3.3 – 6.9 kWh/m² para la península (Sweedler, 1997 en Quintanilla, 1999).

Los valores de radiación solar observada son mayores que los calculados, esto puede ser debido a que el cálculo de radiación solar requiere datos de cobertura de nubes, los cuales no corresponden con el periodo de mediciones (1971-1981). Por otra parte, como se mencionó en la sección de la metodología, para realizar los promedios mensuales de radiación solar incidente observada se tomaron solamente 12 horas del día, de las 6:00 a las 18:00 horas, lo que se traduce en la elevación de la media mensual de radiación solar incidente observada, ya que no se consideran las horas de la noche,

lo cual también contribuye al gran contraste de los valores de radiación calculada incidente con los observados.

Tomando otros datos de referencia tenemos que la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE, 2000) reporta que la radiación promedio diaria para la República Mexicana es de 5 kW hr/m^2 , asimismo reporta que la radiación promedio diaria para el estado de Baja California oscila entre los $7.1\text{-}7.3 \text{ kW hr/m}^2$ para el mes de junio y para el mes de diciembre un promedio entre los $3.7\text{-}3.9 \text{ kW hr/m}^2$.

La radiación incidente es potencialmente explotable para suministrar energía eléctrica a la comunidad de Bahía de los Ángeles si tomamos en cuenta que a la capa superior de la atmósfera llega una radiación promedio de 1360 Watts/m^2 y el promedio mensual de radiación incidente para los meses de verano oscila entre 1000 Watts/m^2 .

Evidentemente las horas del medio día son las óptimas para aprovechar el recurso solar, de esta manera se puede establecer un intercalamiento semidiurno para obtener el mayor número de horas con energía eléctrica disponibles y optimizar el aprovechamiento de los recursos. Tomando en cuenta el comportamiento horario de ambos recursos se puede aprovechar directamente el recurso eólico y almacenar el recurso solar.

Por otro lado en invierno cuando el recurso solar disminuye considerablemente el recurso eólico es un gran complemento para la producción de energía. Análogamente para los meses de primavera y verano cuando el recurso solar es muy abundante puede suplir la posible carencia del recurso eólico.

IX. CONCLUSIONES.

- El potencial eólico calculado integrando la función de densidad de probabilidad Weibull tiene un valor de 365.27 (m/s)^3 , integrando la serie de tiempo de datos de rapidez de viento el potencial tiene un valor de 387.18 (m/s)^3 .
- La cantidad de energía que puede ser producida en base al recurso solar en el mes de diciembre es de 90 kW hr/m^2 por mes, y para el mes de junio se pueden producir 180 kW hr/m^2 por mes, tomando en consideración el uso de sistemas fotovoltaicos de silicio cristalino, con un porcentaje de eficiencia del 23 %.
- Considerando la radiación solar de onda corta calculada para la zona de estudio se pueden generar 54 kW hr/m^2 mensualmente con la radiación calculada para el mes de junio, tomando en cuenta la radiación calculada para el mes de diciembre se pueden generar 22 kW hr/m^2 mensualmente.
- Considerando la distribución horaria y estacional de los recursos solar y eólico se recomienda el aprovechamiento de ambos recursos, señalando que el recurso eólico se encontró con una mayor disponibilidad a partir de las 18:00 hrs hasta las 00:00 horas, y con respecto a la disponibilidad estacional, se encontró que es más abundante en los meses de invierno. Con respecto al recurso solar se encontró que es casi dos veces más abundante en los meses de primavera y verano en comparación con los meses de invierno. Tomando en cuenta la variabilidad horaria y/o estacional de los recursos se puede recomendar el uso intercalado de ambas formas de energía para obtener la mayor producción posible de electricidad.

- Los principales usos que se le dan a la energía eléctrica en la comunidad de Bahía de los Ángeles es la iluminación habitacional, en promedio de 4 a 5 focos de baja potencia, la alimentación de aparatos electrodomésticos, generalmente un televisor, un refrigerador, un abanico y en algunas ocasiones utensilios de cocina, con un consumo promedio de 70 a 130 kW hr por mes.
- Tomando en consideración los datos observados del recurso eólico para la zona de Bahía de los Ángeles, con la turbina eólica BWC-EXCEL de la compañía *Bergey Windpower Company* se pueden generar 14,764 kW hr por año.
- La turbina BWC-EXCEL de la compañía *Bergey Windpower Company* es la turbina recomendada para satisfacer las necesidades energéticas de Bahía de los Ángeles ya que presentó el mejor rendimiento. Por otro lado los sistemas fotovoltaicos de silicio cristalino son los que se recomiendan para satisfacer las necesidades energéticas de la comunidad.

X. BIBLIOGRAFÍA.

- Badan D. A., C. L. Dorman. (1991). The Lower Atmosphere Over the Gulf of California. Journal of Geophysical Research, 96 (C9) 16,877-16,896 p.
- Bergey Windpower Company, página electrónica, última revisión 2000, (dirección: <http://www.bergey.com/>).
- Best Gustavo (1992). Energy for Rural Development. Zed Books Ltd. Inglaterra. pp 3-37.
- Castro, R., Lavin, M.F. and P. Ripa. (1994). Seasonal heat balance in the Gulf of California. Journal of Geophysical Research, 99 (C2) 3249-3261 p.
- Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET), página electrónica, última revisión 2000, (dirección: <http://www.caddet-re.org/>).
- Charlier, Roger Henri (1993). Ocean Energies: environmental, economic, and technological aspects of alternative power sources. Elsevier Science Publishers B.V. Holanda. 21-61 pp.
- Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), página electrónica, última revisión 2000, (dirección: <http://www.conae.gob.mx/>).
- Delgadillo-Macías J., T. Aguilar-Ortega y D. Rodríguez-Velázquez. (1999). Los aspectos económicos y sociales de El Niño. Capítulo 6 en: Los Impactos de El Niño

- en México. Victor O. Magaña (Editor). Dirección General de Protección Civil. Secretaría de Gobernación: 181-212 pp.
- Delgado-González O. E., F.J. Ocampo-Torres, Larios Castillo S. I. (1994). Las brisas durante algunos meses de primavera y el verano en el noroeste del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 20 (3) : 421-440.
 - Habali S.M., Saleh I.A. (1994). Design of stand-alone brackish water desalination wind energy system for Jordan. *Solar Energy*. 52 (6): 525-532.
 - Hernández H. E., A. T. Martínez. (1991). Atlas Solar de la República Mexicana. Universidad Veracruzana, Jalapa Ver. 155 pp.
 - Huacuz, J. (1995). Non-fossil fuel based energy sources. In *energy and Environment in the California-Baja, California border region*. Edited by A. Sweedler, P. Ganster and P. Bennett. Institute for Regional Studies of the Californias, San Diego State University, 1995. 179 pp.
 - Lluch-Cota D., D. Lluch-Belda, S. Lluch-Cota, J. López-Martínez, M. Nevárez-Martínez, G. Ponce-Díaz, G. Salinas-Zavala, A. Vega-Velázquez, J. R. Lara-Lara, G Hamman y J. Morales. (1999). Las pesquerías y El Niño. Capítulo 5 en: *Los impactos de El Niño en México*. Victor O. Magaña (Editor). Dirección general de protección civil. Secretaria de Gobernación: 137-180 pp.
 - Martínez Díaz de León A., P. Coria Méndez (1993). Distribución de probabilidad de la altura del oleaje dentro de la Bahía de Todos Santos, B.C., México. *Ciencias Marinas* 19 (2): 203-218.

- Martínez Manuel (1992). Energy for rural Development. Zed Books Ltd. Inglaterra. pp 219-224.
- Mendenhall W. (1991). Probabilidad y Estadística. Prentice-Hall. México D.F. 341 pp.
- Miles, M.B. and A.M. Huberman. (1994). Qualitative data analysis: An Expanded Sourcebook . 2nd Edition. 338 pp.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), página electrónica, última revisión 2001, (dirección: <http://www.nrel.gov/search.html>).
- Palacios H. E., M.F. Lavín, C. Cabrera. (2001). El Niño and other SST anomalies in the Gulf of California. Departamento de Oceanografía Física, CICESE. Ensenada B.C., México, (en prensa).
- Pavía López (1979). Brisas en la Bahía de Todos Santos, B.C. durante los meses de marzo a agosto de 1978. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada B.C. México. 52 pp.
- Pavía, E.G., y J.J. O'Brien (1996). Weibull statistics of windspeed over the ocean, J. Clim. Appl. Meteorol., 25: 1324 – 1332.
- Quintanilla Montoya Ana Luz (1999). Sistema de evaluación tecnológico de las fuentes alternativas de energía (eólica y solar) para las comunidades rurales de la zona costera pacífico de Baja California, México. Tesis doctoral. Instituto de investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada Baja California. 128 pp.

- Taylor, S.J., Bogdan R. (1998). Introducción a los métodos cualitativos de investigación. Ediciones Paidós Ibérica. España. 343 pp.
- U.S Departament of Energy (US-DEO), página electrónica, última revisión, 2001, (dirección: <http://www.energy.gov/>).