



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.

Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

**ANÁLISIS DE LOS PATRONES DE GENERACIÓN
DE ENERGÍA DE UN SISTEMA SOLAR-EÓLICO EN
MÉRIDA, YUCATÁN.**

Tesis que presenta:

I.F. LIFTER OMAR RICALDE CAB

En opción al título de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE

Mérida, Yucatán, México.

Enero de 2013

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó, para desarrollar mi trabajo de tesis, en las instalaciones del Laboratorio de Energía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán y en colaboración con la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. A razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a ambas Instituciones. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente a la Universidad Autónoma de Yucatán y al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se regirán en todo por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la declaración.

Mérida, Yucatán enero de 2013.

I. F. Lifter Omar Ricalde Cab

El trabajo de tesis titulado “Análisis de los patrones de generación de energía de un sistema solar-eólico en Mérida, Yucatán”, fue desarrollado por el estudiante Lifter Omar Ricalde Cab en las instalaciones del Laboratorio de Energía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán y en colaboración con la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán A. C. bajo la dirección del Dr. Rolando Soler Bientz y del Dr. Luis Felipe Barahona Pérez, en el programa de Posgrado en Ciencias en Energía Renovable de este Centro.

Dr. Felipe A. Vázquez Flota
Coordinador de Docencia
Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de tesis recopila el resultado de un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, dando ánimo y/o acompañando en las diferentes etapas y en los momentos más significativos de su desarrollo.

En primera instancia, agradezco al Dr. Rolando Soler Bientz por su confianza, su paciencia y constancia en la dirección de este trabajo. Al Dr. Luis Felipe Barahona Pérez por su apoyo, su asesoría, los consejos y el ánimo que me brindó. Un merecido agradecimiento por todas las contribuciones realizadas para que esta tesis llegue a su culminación.

Gracias a los miembros del comité tutorial, Dr. Gonzalo Carrillo Baeza y M.C. Roberto Eduardo Quintal Palomo, por su asesoría, por sus valiosas sugerencias y acertados aportes en todo el proceso de elaboración de la tesis.

A los revisores, Dra. Liliana Alzate Gaviria y M.C. Alejandro Pérez Córdoba agradezco la atenta lectura de este trabajo así como todas sus aportaciones y sus atinadas correcciones, las cuales, sin duda, contribuyeron significativamente en la mejora de este trabajo.

Al personal técnico del Laboratorio de Energía de la FIUADY por estar siempre dispuestos a colaborar en el desarrollo experimental de la investigación.

Gracias también a mis compañeros del posgrado por su amistad, por contagiarme el ánimo en el transcurso de la maestría, por los momentos compartidos dentro y fuera de esta Institución.

Muchas gracias a toda mi familia, en especial a mis padres, por su apoyo y aliento incondicional en esta etapa de mi formación profesional.

Índice

ÍNDICE DE TABLAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	5
ANTECEDENTES	5
1.1 El recurso solar.....	5
1.1.1 La radiación solar terrestre.....	5
1.1.2 Movimiento aparente del Sol.	7
1.1.3 Aprovechamiento del recurso solar.	8
1.2 El Recurso eólico.....	14
1.2.1 El viento.	14
1.2.2 Energía contenida en el viento.	16
1.2.3 Efectos de la rugosidad en el perfil vertical del viento.	20
1.2.4 Estabilidad atmosférica.	22
1.3 Los procesos de térmicos.....	26
1.3.1 Los efectos radiativos.....	26
1.3.2 Los efectos convectivos.	29
1.3.3 La conducción térmica.	30
1.4 La generación fotovoltaica.	30
1.4.1 Los sistemas Fotovoltaicos.	30
1.5 La generación eólica.....	35
1.5.1 Los aerogeneradores.	35
1.5.2 Ley de Betz y las curvas de potencia.	40
1.6 Los sistemas híbridos de generación eléctrica.....	41
1.6.1 Clasificación de los sistemas híbridos.	41
1.6.2 El sistema híbrido solar – eólico.	44
CAPITULO 2	49
MATERIALES Y MÉTODOS	49

1.7	Ubicación del sistema de generación híbrido solar-eólico.....	49
1.7.1	Generador fotovoltaico.	51
1.7.2	Generador eólico.....	52
1.7.3	Sistema híbrido solar – eólico.....	53
1.8	Sistemas de medición y caracterización de los parámetros físicos.	55
1.8.1	Sistema de adquisición de datos.	55
1.8.2	Medición de los parámetros de la generación eléctrica.	56
1.8.3	Medición de los recursos solar y eólico.	57
1.9	Metodología.....	61
1.9.1	Análisis de los patrones eléctricos del sistema híbrido.	62
1.9.2	Análisis del comportamiento del recurso solar y la generación fotovoltaica.....	62
1.9.3	Análisis del comportamiento del recurso y generación Eólica.	63
CAPITULO 3		65
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		65
1.1	Generación de energía en el arreglo fotovoltaico.....	65
1.1.1	Radiación solar disponible.....	65
1.1.1.1	Patrón diario promedio anual	65
1.1.1.2	Patrones diarios promedios mensuales	66
1.1.1.3	Radiación solar en el plano del arreglo fotovoltaico	69
1.1.2	Distribuciones de los vientos en el arreglo fotovoltaico.....	69
1.1.2.1	Patrones diarios de velocidad del viento	69
1.1.2.2	Patrones diarios de dirección del viento.....	71
1.1.2.3	Distribución de frecuencias de los vientos por direcciones y por hora	72
1.1.3	Patrones térmicos registrados en la superficie del arreglo fotovoltaico.	74
1.1.4	Energía eléctrica producida por el arreglo fotovoltaico.	76
1.2	Comportamiento de la generación eólica.....	78
1.2.1	Perfil vertical del viento en el entorno del generador eólico	78
1.2.1.1	Patrones diarios.....	78
1.2.1.2	Distribución de velocidades por direcciones.....	79
1.2.1.3	Patrón de velocidades anual	80
1.2.2	Estabilidad atmosférica	81

1.2.3	Cizalladura y perfil vertical térmico del viento	81
1.2.4	Energía eléctrica producida por el aerogenerador.....	84
1.3	Patrones eléctricos del sistema híbrido Solar-Eólico.....	85
1.3.1	Disponibilidad combinada de los recursos solar y eólico.	85
1.3.1.1	Patrón diario de los recursos combinados	85
1.3.1.2	Patrón anual del recurso híbrido	86
1.3.2	Comportamiento de los patrones de generación eléctrica del sistema híbrido.....	87
PERSPECTIVAS.....		92
BIBLIOGRAFÍA.....		93
ANEXOS.....		97
Anexo A. Características técnicas - operativas de los sistemas de medición y caracterización de los parámetros eléctricos.....		97
Anexo B. Características técnicas - operativas de los sistemas de medición y caracterización de los recursos solar y eólico.....		99
Anexo C. Los resultados de este trabajo de investigación fueron presentados en los siguientes congresos internacionales del área.		101

Índice de Tablas

Tabla 1. Clases de estabilidad atmosférica en términos de la longitud de Obukhov (L). ..	24
Tabla 2. Clasificaciones de las configuraciones en arreglos y sistemas fotovoltaicos.	33
Tabla 3. Clasificación de aerogeneradores de eje horizontal para producción eléctrica en función de su potencia [17].	38
Tabla 4. Parámetros geográficos del sitio de medición.	50
Tabla 5. Características técnicas del arreglo fotovoltaico estático de Silicio monocristalino de 1.6 KW.	51
Tabla 6. Generador Bergey Windpower de 1.5 KW.	53
Tabla 7. Características operativas generales del sistema de generación híbrida eólica-solar.	54
Tabla 8. Especificaciones del adquiridor de datos CR10X.	97
Tabla 9. Características técnicas del sensor de corriente CSLA2CD.	97
Tabla 10. Características técnicas del transductor de corriente y voltaje para las señales en CD.	98
Tabla 11. Características técnicas del transductor de corriente en CA.	98
Tabla 12. Características técnicas del transductor de voltaje en CA.	98
Tabla 13. Características operativas de la estación solarimétrica y características técnicas del piranometro y pirheliometro instalado.	99
Tabla 14. Características operativas de los sensores empleados para la caracterización del recurso eólico presente en el sitio de instalación del sistema híbrido de estudio.	99
Tabla 15. Especificaciones técnicas de los sensores instalados en la torres de medición en el techo donde está localizado el arreglo fotovoltaico.	100

Índice de Figuras

Figura 1. Procesos que afectan a la radiación solar al pasar por la atmósfera terrestre [12].	7
Figura 2 Esquema que representa el sistema formado por el Sol y la Tierra. En este esquema también se muestra la posición de la Tierra al comienzo de cada estación (solsticios y equinoccios) a lo largo del ciclo anual [12].	8
Figura 3. Características físicas y geométricas de un piranómetro [12].	9
Figura 4. Esquemas para la medición de la radiación solar global y la radiación solar difusa [12].	10
Figura 5. Características físicas de un pirheliómetro [12].	11
Figura 6. Características geométricas de un pirheliómetro [12].	11
Figura 7. Circulación general del viento en la superficie terrestre [17].	15
Figura 8. Diagrama de la potencia energética del viento.	17
Figura 9. Perfil de velocidades del viento de acuerdo a la superficie medida [17].	21
Figura 10. Componentes de la radiación global sobre una superficie.	27
Figura 11. Balance energético en la superficie de un cuerpo.	28
Figura 12. Esquema general del flujo de un fluido sobre una superficie a diferentes temperaturas [25].	29
Figura 13. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de radiación (temperatura constante de 25°C) [16].	32
Figura 14. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes temperaturas de operación (irradiancia constante 1,000 W/m ²) [16].	33
Figura 15. Aerogeneradores (a) Rotor Savonius, (b) Molino multipala y (c) Aerogenerador Darrieux.	36
Figura 16. Aerogeneradores clásicos de hélice.	37
Figura 17. Aerogenerador pequeño para aplicaciones aisladas.	39
Figura 18. Aerogenerador de gran escala (1.5 MW) para centrales eólicas.	40
Figura 19. Curva de potencia característica de un Aerogenerador.	41
Figura 20. Esquema general de un sistema híbrido autónomo eólico-fotovoltaico.	46
Figura 21 Ubicación geográfica del sitio de mediciones en el noroeste de la Península de Yucatán, México.	49

Figura 22 Sistema híbrido solar-eólico.....	50
Figura 23. Arreglo fotovoltaico estático de Silicio monocristalino de 1.6 KW.....	51
Figura 24. Aerogenerador Bergey de 1.5 KW: (izquierda) diagrama de instalación, (centro) vista general de la torre de instalación y (derecha) vista del aerogenerador.....	52
Figura 25. Esquema de interconexión del sistema híbrido fotovoltaico-eólico-baterías. ..	54
Figura 26. Adquiridor de datos CR10X.	56
Figura 27. Diagrama representativo de las variables de interés para cada subsistema en el sistema híbrido de estudio.....	56
Figura 28. Diagrama y configuración de los sensores de voltaje-corriente VCD y VCA. ..	57
Figura 29. Vista general de la estación solarimétrica (izquierda) y vista de los sensores empleados para medición de los componentes de la radiación solar.	58
Figura 30. Vista de 400m x 400m del área circundante en el sitio de medición, se muestran los sectores direccionales con el centro en la torre de medición.	59
Figura 31. Vista de la estación anemométrica instalada a 30 metros de altura para la evaluación del recurso eólico.....	59
Figura 32. Vista del arreglo fotovoltaico con los identificadores individuales para cada módulo.....	60
Figura 33. Ubicación de los sensores de temperatura de superficie instalados en los módulos fotovoltaicos.	60
Figura 34. Mini-torre instalada para el arreglo fotovoltaico con los sensores de temperatura ambiente, de velocidad y dirección de viento.....	61
Figura 35. Comportamiento diario de las componentes de la radiación solar.....	65
Figura 36. Patrones diarios de la radiación Solar mensual de abril a septiembre: (a) Radiación Solar directa (b) Radiación Solar Global.	67
Figura 37. Patrones diurnos de la radiación Solar mensual de octubre a marzo: (a) Radiación Solar directa (b) Radiación Solar Global.	68
Figura 38. Comportamiento de la radiación solar en los planos horizontal y del arreglo fotovoltaico durante el periodo de estudio. (Global).	69
Figura 39. Ciclos diarios del comportamiento de la velocidad del viento correspondientes al período del mes de octubre a aumentar marzo.....	70
Figura 40. Ciclos diarios del comportamiento de la velocidad del viento correspondientes al periodo del mes de abril a septiembre.	70

Figura 41. Ciclos diarios del comportamiento de la dirección del viento correspondientes al período del mes de octubre a marzo.....	72
Figura 42. Ciclos diurnos del comportamiento de la dirección del viento correspondientes al periodo del mes de marzo a septiembre.	72
Figura 43. Distribución de las frecuencias de la dirección del viento durante: a) la noche, cuando se presenta la disminución de la temperatura ambiente, b) el día, cuando se presenta el aumento de la temperatura ambiente y c) la tarde, cuando se presenta la disminución de la temperatura ambiente.....	74
Figura 44. Valores promedio de las mediciones en el patrón diario de las temperaturas en la superficie de los módulos fotovoltaicos para todo el período de estudio.....	75
Figura 45. Rango de la variación de las temperaturas en los patrones diurnos medidos en los sensores instalados para todo el periodo de estudio.....	76
Figura 46. Promedios horarios para cada mes de la corriente eléctrica producida por el arreglo fotovoltaico.....	76
Figura 47. Promedio horarios de todo el período de la corriente y voltaje eléctrico producido por el arreglo fotovoltaico.	77
Figura 48. Comportamiento de la velocidad y dirección del viento en el ciclo diurno.....	79
Figura 49. Promedios de las velocidades de viento para cada sector de dirección.	80
Figura 50. Promedios de la velocidad del viento sobre la estabilidad ciclo-atmosférica anual.....	80
Figura 51. Distribución diurna de las clases de estabilidad atmosférica.	81
Figura 52. Patrón diurno de los valores promedios de la cizalladura del viento y la temperatura ambiente en el periodo de estudio.	82
Figura 53. Patrones diarios estacionales de la cizalladura del viento (a) y la temperatura ambiente (b).	83
Figura 54. Promedios horarios para cada mes de la corriente eléctrica producida por el aerogenerador.	84
Figura 55. Promedio horarios de todo el periodo de la corriente y voltaje eléctrico producido por el aerogenerador.....	85
Figura 56. Promedios horarios del ciclo diario de la radiación solar y la velocidad del viento en el periodo de estudio.	86

Figura 57. Promedios mensuales de la radiación solar y la velocidad del viento en el período de estudio.	87
Figura 58. Promedios horarios de todo el periodo de la corriente eléctrica producida por el sistema hibrido eólico-fotovoltaico.	88
Figura 59. Promedios horarios para el mes de septiembre, cuando se registró la mayor generación del arreglo fotovoltaico y la mínima del generador eólico.....	89
Figura 60. Promedios horarios para el mes de diciembre, cuando se registró la mayor generación del eólico y la mínima de arreglo fotovoltaico	89
Figura 61. Poster del trabajo “Analysis of the Solar and Wind Resources for Applications in Hybrid Systems in the Yucatan Peninsula”, presentado en el 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, USA.	102
Figura 62. Poster del trabajo “Study of a PV-Wind System in Tropical Conditions”, presentado en el 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, USA.....	103

RESUMEN

Los trabajos de evaluación de sistemas híbridos para la generación eléctrica, particularmente los sistemas eólico-fotovoltaicos, hacen hincapié en la evaluación del potencial de los recursos renovables *in situ* para poder estimar la disponibilidad y características del recurso solar-eólico y de esta manera poder diseñar y dimensionar estos sistemas de generación.

El presente trabajo tuvo como objetivo principal el análisis de los patrones de la generación de energía eléctrica de un sistema híbrido autónomo solar-eólico en la ciudad de Mérida, Yucatán. Para ello, se definió y configuró un sistema híbrido autónomo solar-eólico, se caracterizaron los principales parámetros que influyen en la disponibilidad del recurso solar-eólico y finalmente se analizaron los regímenes de generación eléctrica del sistema. La metodología utilizada consistió en realizar mediciones durante el período comprendido entre agosto de 2010 y junio de 2011. Con los datos obtenidos se analizó el comportamiento de las variables meteorológicas y de potencia del sistema híbrido a partir de sus componentes fotovoltaico y eólico.

Los resultados de la evaluación del recurso solar, indicaron que los días típicos con menor radiación solar global corresponden a los meses de diciembre y enero con valores promedio de $650 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Los días con mayor radiación se presentaron en los meses de abril y septiembre con valores promedio de $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Por otra parte, el recurso eólico presentó las máximas velocidades en el mes de marzo ($> 7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) y los mínimos en septiembre ($\approx 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). La velocidad del viento y la radiación incidente (región IR) afectaron el comportamiento de las temperaturas superficiales de los módulos del arreglo fotovoltaico, ya que se registraron diferencias de hasta 12°C . No obstante, a partir de las mediciones de corriente en el sistema fotovoltaico, se pudo observar que el efecto dominante en la salida de potencia del mismo se debió a la radiación incidente (región Visible). Durante los meses de diciembre y enero se obtuvo el mejor rendimiento operativo del aerogenerador con una corriente máxima registrada de 8 Amp, mientras que para el arreglo fotovoltaico se obtuvieron valores medios de esta variable, 18 Amp, haciendo que el rendimiento del arreglo fuera bajo. El mejor desempeño registrado por el arreglo fotovoltaico sucedió en el mes de septiembre con una corriente promedio de 24 Amp y en este mismo mes, el aerogenerador presentó su rendimiento más bajo con una corriente

promedio de 2 Amp.

El análisis de los comportamientos de los recursos solar y eólico demostró que son inversamente proporcionales a lo largo del día. Por la mañana, el recurso solar va en aumento conforme el recurso eólico decrece y por la tarde sucede lo contrario. De esta manera, se puede tener disponibilidad en la generación eléctrica del sistema híbrido a lo largo del día.

En cuanto al comportamiento estacional de los recursos, el inicio en la disminución de los promedios mensuales en las velocidades del viento se presenta en el mes de mayo y coincide con el máximo de la disponibilidad de radiación solar. Por otro lado, los valores mínimos mensuales de la velocidad del viento se registran entre los meses de agosto y septiembre, lo cual coincide cuando la radiación solar registra su segundo máximo en el patrón anual. Durante todo el invierno, la contribución a la generación de la corriente eléctrica estuvo dominada por el aerogenerador, el efecto contrario se presentó durante el verano, cuando el arreglo fotovoltaico fue el que aportó la mayor contribución a la generación de energía.

En este trabajo se pudo concluir que los recursos eólico y solar presentan patrones similares tanto diurnos (mañana-tarde) como estacionales (verano-invierno).

ABSTRACT

The performance evaluation of hybrid systems for electricity generation, specially the wind-solar systems, usually emphasize on the assessment of the renewable resources in order to estimate the resource availability and characteristics for designing and final size of these systems.

The present work had as main objective the analysis of power generation patterns for a hybrid, autonomous solar-wind system in the city of Merida, Yucatan. The system was first configured and the main parameters that influence on the availability of solar and wind resources were characterized. Finally, the systems electricity generation patterns were analyzed. The methodology consisted of measurements during the period between August 2010 and June 2011. With these data, the meteorological and power variables of the hybrid system were analyzed from its photovoltaic and wind components.

The results of the solar resource assessment indicated that typical days with low global solar radiation correspond to December and January with average values of $650 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Days with higher radiation occurred in April and September with average values of $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Moreover, the wind resource presented the highest speeds in March ($> 7 \text{ m/s}$) and the lowest in September ($\approx 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Wind speed and incident radiation (IR region) affected the behavior of the surface temperatures on the photovoltaic array modules; they reached differences between modules close to 12°C . However, from the current measurements in the photovoltaic system, it was observed that the dominant effect on the power output was due to incident radiation (visible region). During the months of December and January the best operating performance of the wind turbine was obtained with a maximum current of 8 Amp, while for the photovoltaic array average values of this variable were obtained (18 Amp), giving a low performance of the array. The best performance recorded by the photovoltaic array occurred in September with an average current of 24 amps and at the same time, the turbine presented its lower performance with an average current of 2 Amp.

The analysis of the behavior of solar and wind resources showed that are inversely proportional throughout the day. In the morning, the solar resource increases as the wind resource decreases. At evening, the opposite happens and electricity generation can be available from the hybrid system the whole day.

Regarding the seasonal behavior of resources, a decrease of monthly average wind

speeds begins in May and coincides with the maximum availability of solar radiation. Furthermore, the minimum monthly wind speed recorded between the months of August and September, coincides with the second peak in the annual pattern of the solar radiation. Throughout winter, the contribution to the generation of electric current was dominated by the wind turbine, the opposite effect occurred during the summer, when the photovoltaic array provided the greatest contribution to power generation.

In this study it was concluded that wind and solar resources have similar patterns both day (morning-afternoon) and seasonal (summer and winter).

INTRODUCCIÓN

La problemática ambiental, la disminución de las emisiones de gases efecto invernadero, y el desarrollo e investigación de nuevas fuentes de energía para la generación de electricidad son temas de gran interés en el desarrollo tecnológico y social en nuestros días. En México desde 1997 se han realizado diversos estudios para identificar tecnologías de mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI), con el propósito de analizar su potencial y los correspondientes costos para el sector energético; esta iniciativa se ha concentrado esencialmente en el incremento de la eficiencia energética, la sustitución de combustibles, la reducción del consumo e implementación de sistemas alternos de energía [1]. Las tecnologías que presentan un mayor desarrollo y aplicación en la generación de electricidad son los sistemas fotovoltaicos y los generadores eólicos [2,3].

La energía eólica, tiene su origen en el movimiento de las masas de aire en la atmósfera terrestre. Este movimiento es generado por la presencia de gradientes de temperatura en las diferentes latitudes del planeta, debido a la diferente cantidad de radiación solar que incide en la superficie de la Tierra. Este fenómeno genera gradientes en las densidades máxicas del aire en ciertas regiones y por tanto se forman corrientes de difusión de las partículas presentes; a esta corriente de difusión se le denomina “viento”. La energía cinética contenida en el viento puede ser aprovechada a través de sistemas mecánicos llamados “aerogeneradores”, los cuales recolectan la energía a través de aspas para mover una turbina [2]. El crecimiento de las aplicaciones de la energía eólica ha sido acelerado, estimaciones indican que este tipo de energía satisface de electricidad a unos 14 millones de hogares y más de 35 millones de personas, en el planeta, y hoy en día existen más de 55 mil aerogeneradores instalados [4].

Entre los principales problemas para el aprovechamiento de la energía eólica está la variabilidad de la potencia energética debida a los cambios en la velocidad del viento y la eficiencia operativa del aerogenerador. En nuestro país, el aprovechamiento de los recursos eólicos se limitó durante muchos años al uso de los molinos de viento tipo americano o veletas para el bombeo de agua; sin embargo, fue hasta los años noventa que se tomó de manera seria la posibilidad del empleo del potencial energético eólico en

diferentes regiones del país. Consecuencia de esto, en el año de 1993 se desarrolló la central eoloelectrica experimental de La Venta, en el estado de Oaxaca [5], y en el año 2010 se inauguró el parque eólico de La Rumorosa en Baja California, con una capacidad de 10 MW. De forma paralela, se tienen trabajos sobre la evaluación del recurso eólico en diferentes partes del país. En la región sureste, específicamente la Península de Yucatán, se han desarrollado trabajos enfocados para el aprovechamiento de este tipo de recurso, entre los que se puede mencionar los estudios del potencial del viento en la región norte de la ciudad de Mérida y en la franja costera del Estado [6,7].

Otra tecnología para la generación de energía alterna, que presenta un crecimiento similar a la energía eólica, es la generación de electricidad a través de los sistemas fotovoltaicos (FV). Esta tecnología tuvo su nacimiento a mediados del siglo XIX, su principio básico es convertir la luz solar en electricidad. Este tipo de generación tiene una dependencia directa de la radiación solar incidente, de hecho, estimaciones indican que alrededor del 55% de la energía del Sol que incide sobre estos dispositivos no puede ser utilizada, ya que la energía contenida en los fotones incidentes está por debajo o por encima de la energía necesaria para romper los enlaces de los materiales y liberar el electrón que finalmente contribuirá a la corriente foto generada. Por lo general, se habla de un rango aprovechable en estos dispositivos FV desde el infrarrojo hasta el ultravioleta (de 0.5 a 2.9 eV aproximadamente). Nuestro país está localizado en una franja solar con una insolación media de $5 \text{ KWh}\cdot\text{m}^{-2}$ [1, 8], sin embargo a pesar que se tenga un recurso solar considerable, existen otros parámetros importantes que influyen en la operación y generación de energía de los dispositivos fotovoltaicos. Entre estos parámetros está la temperatura de operación de la celda, que afecta a las características eléctricas de estos dispositivos, efectos de transferencia de calor hacia el medio ambiente, presencia de nubosidades, entre otros, todo esto implica que estos sistemas sean complejos al momento de evaluar su desempeño.

A pesar de que la implementación de estas tecnologías de generación eléctrica tienen la capacidad de operar de forma independiente, la tendencia a nivel mundial es el uso de sistemas híbridos, el cual se puede definir con un conjunto de dos o más sistemas integrados de aprovechamiento de diferentes fuentes de energía en un sitio de interés (solar, eólica, biomasa, micro hidráulica, etc.). La aplicación de los sistemas es el resultado del desarrollo y la implementación de tecnologías para el aprovechamiento de

mayor cantidad y tipos de recursos energéticos disponibles en una región determinada, combinando las ventajas inherentes a cada uno de los subsistemas y tecnologías seleccionadas para este propósito. En general la aplicación de los sistemas híbridos se desarrolla satisfactoriamente en proyectos de electrificación donde, por la magnitud de la demanda y la lejanía a los centros de población urbana, resulta económicamente inviable el uso de las energías convencionales para satisfacer la demanda energética.

Los sistemas híbridos solar-eólico son diseñados para la generación de electricidad a partir de la Energía Solar y la Energía Eólica combinadas, obteniendo una mayor confiabilidad en el flujo de energía hacia las cargas alimentadas, y afrontando con éxito los altibajos de alguno de los recursos o la falla de algunos de sus elementos, es decir permite garantizar el suministro eléctrico en los sitios apropiados que disponen de las dos fuentes de energía.

A pesar de que los sistemas híbridos brindan una opción de aprovechamiento de los diferentes recursos presentes en un sitio, siempre estarán sujetos a las limitaciones de cada una de las tecnologías que se empleen en la generación o almacenamiento de energía, y al mismo tiempo a las variaciones del recurso en el sitio, por lo que para una óptima operación de estos sistemas integrados es importante un correcto dimensionamiento y maximizar el aprovechamiento del recurso energético presente.

En este trabajo se configuró un sistema híbrido solar-eólico y se llevaron a cabo mediciones de la radiación solar y de la velocidad y dirección del viento durante un período de un año para luego realizar un análisis de la generación de energía eléctrica en las condiciones de la ciudad de Mérida, Yucatán.

Justificación.

Buscando innovar e impulsar el desarrollo en materia de energía para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y satisfaciendo la demanda de nuestras sociedades mediante el uso planeado de energías limpias, se ha observado un aumento de los proyectos de instalación de sistemas de generación de energía eléctrica a través de los sistemas fotovoltaicos y los sistemas eólicos autónomos a lo largo del país. Sin embargo, son pocos los proyectos en los cuales se instalan sistemas combinados o sistemas híbridos solar-eólico. El presente trabajo propone una metodología de

evaluación de la factibilidad del empleo de un sistema de generación híbrido solar-eólico, para el caso particular del estado de Yucatán. El proyecto evalúa la disponibilidad del recurso solar y eólico en el sitio de instalación permitiendo obtener información crítica para el dimensionamiento de estos sistemas en diversas aplicaciones, al mismo tiempo, se analiza el comportamiento de generación eléctrica del sistema en el periodo de medición, su relación con la disponibilidad y comportamiento de los recursos presentes y la viabilidad de la implementación de estas tecnologías.

Los resultados de este trabajo vienen a contribuir en la difusión e impulsar al mismo tiempo la aplicación de las energías renovables en la región del sureste mexicano, particularmente en esta propuesta concreta, utilizar el viento y el Sol para generar electricidad mediante la promoción de sistemas híbridos.

Hipótesis.

Se sabe que los recursos solar y eólico tienen períodos máximos y mínimos de disponibilidad a lo largo del año. Es posible que los valores máximos no se alcancen al mismo tiempo para ambos recursos. El estudio de los recursos mediante un sistema solar-eólico permitirá predecir el patrón de comportamiento en la generación anual de este tipo de energía alterna en la ciudad de Mérida.

Objetivo general.

Realizar un estudio de los patrones de la generación de energía de un sistema híbrido solar-eólico en las condiciones de la ciudad de Mérida, Yucatán, México.

Objetivos específicos.

1. Definir la configuración del sistema híbrido autónomo solar-eólico a estudiar.
2. Caracterizar los principales parámetros que influyen en la disponibilidad de energía de los recursos solar y eólico durante un período de un año.
3. Analizar los regímenes de generación eléctrica del sistema híbrido solar-eólico.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 El recurso solar.

1.1.1 La radiación solar terrestre.

La radiación solar se compone de ondas electromagnéticas provenientes del sol. Se considera que la radiación solar no sufre alteraciones durante su trayecto por el espacio exterior, sin embargo a medida que nos alejamos del Sol la densidad de potencia por unidad de área disminuye, ya que la radiación emitida por la superficie del Sol se distribuye sobre un área mayor que la superficie esférica solar. La radiación por unidad de área perpendicular a los rayos solares, fuera de la atmósfera terrestre y a la distancia media al Sol, es relativamente constante, aunque varía ligeramente dependiendo de la actividad solar y principalmente a la trayectoria de traslación de la Tierra, este valor de radiación se denomina constante solar. El valor promedio de la constante solar es de $1.353 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, aceptado por la NASA, otras fuentes citan un valor de $1.367 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ [9, 10].

La radiación solar terrestre está constituida por la porción de la radiación que llega a la Tierra interactuando con la atmósfera y la superficie terrestre; de donde se tiene que la densidad de potencia que incide sobre la superficie de un objeto debido a la radiación proveniente del Sol se le conoce como irradiancia solar.

Cuando la radiación pasa a través de la atmósfera interactúa con los gases atmosféricos tales como son O_2 , CO_2 , O_3 , N_2 , H_2O y las partículas de polvo para ser reflejada, dispersada y absorbida. La radiación de onda corta (ultravioleta) es absorbida principalmente por el O_3 mientras que la radiación de onda larga es absorbida por el vapor de agua. La radiación reflejada y dispersada se convierte en radiación difusa y la componente que continúa su camino se le denomina radiación directa. De la misma manera, la radiación solar directa con longitudes de onda menores que $0.2 \text{ }\mu\text{m}$ es totalmente absorbida por el O_3 y la mayor de $0.35 \text{ }\mu\text{m}$ es transmitida hacia el espacio exterior en su totalidad. El vapor de agua absorbe la radiación de longitud de onda mayor de $2.3 \text{ }\mu\text{m}$. Gran parte de las aplicaciones prácticas de la energía solar comprenden únicamente el empleo de la radiación solar directa de longitudes de onda entre 0.29 y 2.5

μm la cual llega a representar el 95.19% de la constante solar [9, 10].

En resumen, la radiación que llega a la superficie terrestre se le conoce con el nombre de radiación de onda corta y presenta grandes variaciones en intensidad y frecuencia, causadas principalmente por:

- 1 Dispersión de Rayleigh o dispersión por moléculas en la atmósfera, el cual atenúa la luz solar en todo el espectro, pero el proceso afecta principalmente a las longitudes de onda corta.
- 2 Dispersión por aerosoles y partículas del polvo.
- 3 Absorción por la atmósfera y los gases que actúan como filtros para ciertas longitudes de onda, entre las más importantes están: el oxígeno, el ozono, el vapor de agua, y el dióxido de carbono.
- 4 La posición geográfica (latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar).
- 5 La hora, día y mes del año.

Como se mencionó, la radiación incidente en la superficie terrestre, presenta dos componentes: la radiación directa y la radiación difusa [11].

La radiación difusa, es la porción que se presenta en forma indirecta aparentando provenir de cualquier dirección y es originada principalmente en la atmósfera por el proceso de dispersión.

La radiación directa, es la porción que llega a la superficie terrestre sin ser afectada por el proceso de dispersión, pudiéndose identificar su fuente, en este caso el Sol. Es la componente de la radiación que contiene la mayor cantidad de energía y es la de mayor utilidad en las aplicaciones de la tecnología solar.

Cuando se habla de la radiación global se refiere a la suma de las contribuciones tanto de la radiación difusa como la directa. La Figura 1 muestra un esquema de los diferentes procesos que afectan a la radiación solar al pasar por la atmósfera terrestre.

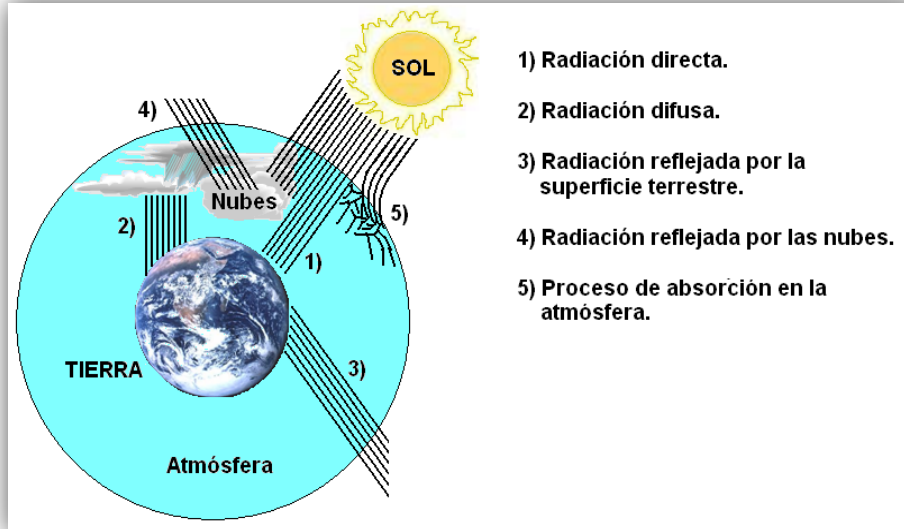


Figura 1. Procesos que afectan a la radiación solar al pasar por la atmósfera terrestre [12].

1.1.2 Movimiento aparente del Sol.

Otro elemento que afecta la variabilidad de la radiación solar incidente en la superficie terrestre e independiente de los efectos de los elementos de la atmósfera, es el movimiento de traslación y rotación del planeta. El movimiento de rotación somete a la radiación solar a la intermitencia del día y la noche, mientras que el movimiento de traslación alrededor del Sol somete a la radiación solar a variaciones estacionales a lo largo del año.

El sistema Sol-Tierra representado en la Figura 2, describe que la Tierra se mueve en una trayectoria de forma elíptica en uno de cuyos focos se localiza el Sol. La distancia media de la Tierra al Sol es de 150 millones de km [9], desde esta distancia el disco solar subtiende un ángulo de aproximadamente 32° de arco. La distancia del Sol a la Tierra varía día con día, de tal manera que a lo largo del año la variación total es de aproximadamente $\pm 1.7\%$ [13], lo cual tiene consecuencias en la variación diaria de la constante solar.

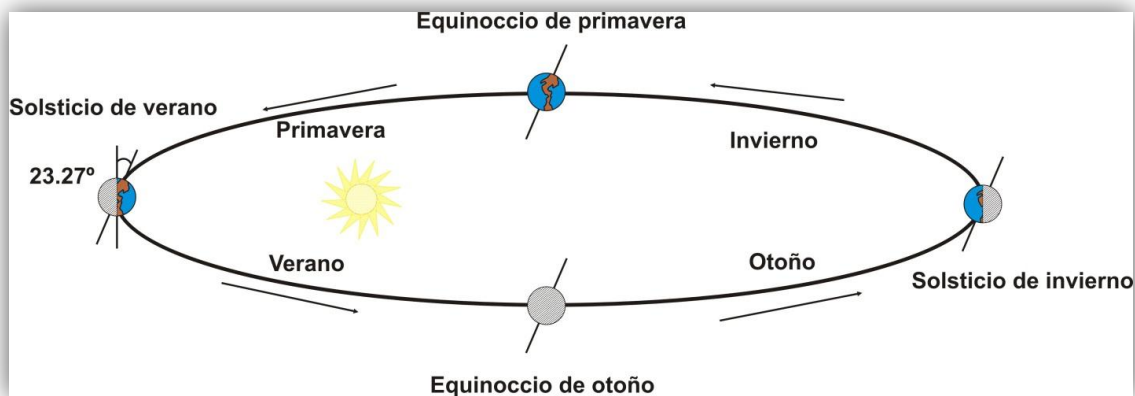


Figura 2 Esquema que representa el sistema formado por el Sol y la Tierra. En este esquema también se muestra la posición de la Tierra al comienzo de cada estación (solsticios y equinoccios) a lo largo del ciclo anual [12].

Otras consecuencias que se tienen, dadas estas circunstancias geométricas, son los efectos sobre la irradiancia (densidad del flujo de energía de radiación, W/m^2) que incide a diferentes ángulos sobre una superficie localmente horizontal en posición tangente a la Tierra. Estos efectos se deben a la variación del ángulo de incidencia de los rayos solares a lo largo del día y a lo largo del año. Para cuantificar estos ángulos se recurre a dos sistemas de coordenadas, por medio de los cuales se describe el movimiento aparente del Sol respecto de un punto sobre la Tierra y respecto de la Tierra misma, estos sistemas son los denominados como sistema de coordenadas local y sistema de coordenadas geocéntrico, respectivamente [10].

Dependiendo del lugar geográfico en la superficie del planeta donde una persona u objeto se encuentre, se tendrán variaciones de la cantidad de radiación solar incidente (cantidad de energía) lo que dictará el tipo de aplicaciones a utilizar para el aprovechamiento de este recurso.

1.1.3 Aprovechamiento del recurso solar.

Para el aprovechamiento del recurso solar, es imprescindible su evaluación para poder determinar el tipo de aplicación y tamaño de la misma. Como se mencionó anteriormente radiación solar se divide en tres componentes, y son las que deben ser medidas para caracterizar este tipo de recurso.

El instrumento para la medición de la radiación global es el llamado *Piranómetro*, el parámetro físico (radiométrico) que mide es la densidad de flujo de radiación solar global o irradiancia global, en unidades de $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Las características geométricas principales de un piranómetro son las siguientes: el sensor consta de una superficie plana colocada horizontalmente, de tal manera que puede recibir radiación de todas direcciones, procurando que su campo de medición esté limitado al hemisferio celeste, evitando en lo posible, tener obstáculos en el horizonte a su alrededor. Con estas características este instrumento es capaz de recibir en su sensor tanto la radiación difusa como la componente de la radiación directa que incide perpendicularmente sobre él. La Figura 3 muestra un ejemplo de piranómetro.

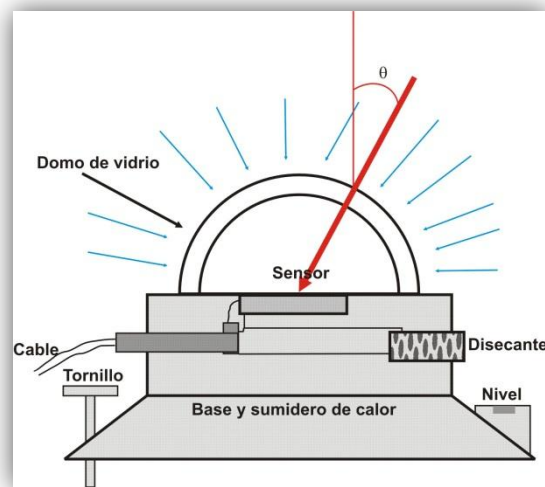


Figura 3. Características físicas y geométricas de un piranómetro [12].

Para la medición de la radiación difusa, se puede emplear un piranómetro asegurándose de bloquear la radiación directa (Figura 4). Como el Sol se mueve a lo largo del día esto requiere dispositivos especiales. El más sencillo es una banda sombreadora. Esta banda se coloca de manera que bloquee la radiación durante toda la trayectoria del sol. No se quiere que la banda sea muy ancha para que no bloquee demasiada radiación difusa. Por otro lado, la trayectoria del sol cambia cada día de una manera perfectamente conocida. Esto implica que la banda no puede cubrir al Sol todo el tiempo y se hace necesario

estarla ajustando al menos un par de veces a la semana.

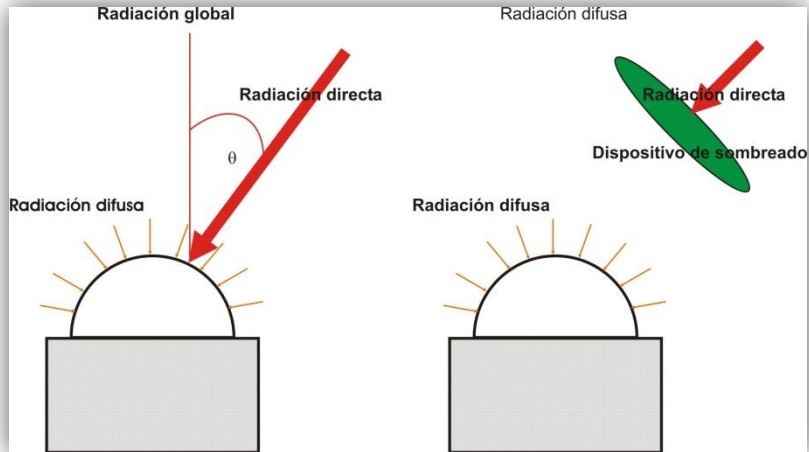


Figura 4. Esquemas para la medición de la radiación solar global y la radiación solar difusa [12].

Para el caso de la medición de la radiación solar directa se usan *Pirheliómetros*. El parámetro físico (radiométrico) que miden los pirheliómetros es la densidad de flujo de energía de radiación o irradiancia en unidades de $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Las características físicas y geométricas principales que tiene este instrumento son las que se muestran en las Figura 5 y Figura 6. Por las limitaciones prácticas en los mecanismos de seguimiento, el Pirheliómetro puede recibir energía de un cono de 5 a 7° de apertura, la cual es mayor que la del disco solar que corresponde aproximadamente a 0.5°. [9, 13, 14].

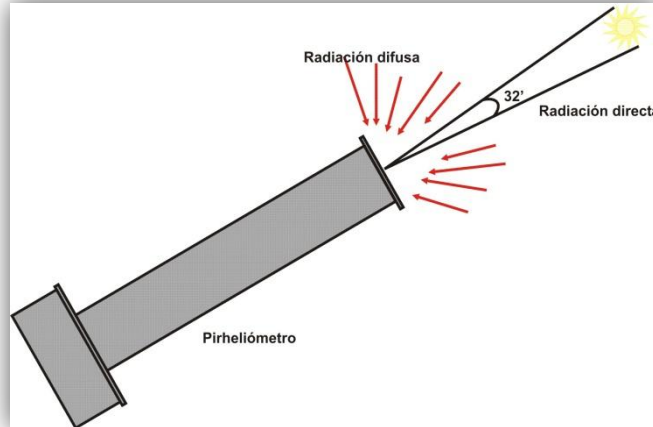


Figura 5. Características físicas de un pirheliómetro [12].

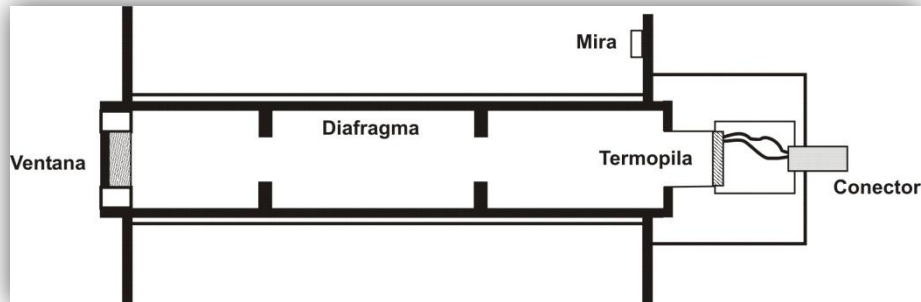


Figura 6. Características geométricas de un pirheliómetro [12].

Para el aprovechamiento del recurso solar terrestre se tiene las siguientes formas tecnológicas:

Sistemas Térmicos Para el Aprovechamiento de la Energía Solar. Existen diferentes maneras de clasificar a los sistemas térmicos: de acuerdo al tipo de colector solar empleado, de acuerdo a la temperatura de operación o de acuerdo a la aplicación final de la energía térmica obtenida. Es difícil hacer una correspondencia exacta entre estas diferentes formas de clasificación, así como resulta un poco artificial establecer fronteras muy bien definidas entre una categoría y otra.

No obstante, se puede mencionar tres categorías principales para estas aplicaciones: generación termosolar de potencia, calor solar de procesos industriales y calentamiento de agua y acondicionamiento de espacios. En particular, la segunda categoría es muy amplia en las aplicaciones que incluye, ya que se suele englobar en ella una gran variedad de procesos de todo tipo de industrias. De las tres categorías, la de calentamiento solar de agua y acondicionamiento de espacios es la que ha alcanzado un grado mayor de madurez, con aplicación en una escala muy significativa en varios países del mundo. La generación termosolar de potencia también ha sido aplicada exitosamente en la historia reciente y está comenzando a cobrar mayor importancia en términos de instalaciones comerciales. La generación térmica solar para procesos industriales es la que está menos investigada. En algunos casos, las tecnologías solares implicadas en la generación del calor de procesos son las mismas que para el calentamiento de agua, sin embargo, todavía es necesario trabajar en el desarrollo de colectores y realizar investigación sobre la integración de sistemas para poder generalizar este tipo de aplicaciones en el caso de temperaturas superiores a los 120°C [15].

Sistemas Fotovoltaicos Para el Aprovechamiento de la Energía Solar. La tecnología solar fotovoltaica (FV) consiste en la conversión directa de la radiación del Sol en electricidad. Esta conversión se realiza a través de la celda fotovoltaica, unidad básica en la que se produce el efecto fotovoltaico.

Una primera clasificación de los sistemas fotovoltaicos es [16]:

1. Sistemas fotovoltaicos autónomos: son aquellos que están aislados de la red eléctrica.
2. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red, son aquellos que están directamente conectados a la red eléctrica.

Una de las principales características de los generadores fotovoltaicos que los diferencia de otras fuentes de energía renovable es que únicamente producen electricidad cuando reciben la luz del Sol (irradiancia solar) y además la cantidad de energía que generan es directamente proporcional a la irradiancia solar que incide sobre su superficie. En multitud de aplicaciones, el consumo energético se produce independientemente de la radiación solar (por ejemplo: un sistema de iluminación donde se consume energía durante la

noche). En este tipo de aplicaciones es necesario incluir un sistema de almacenamiento energético o de acumulación, (baterías). En otras aplicaciones, como el bombeo de agua o los sistemas conectados a la red no se necesitan baterías, en el primer caso la energía se acumula en forma de energía hidráulica mientras que en el segundo la energía se acumula en la propia red eléctrica.

En general, un sistema fotovoltaico estará formado por:

1. Un generador fotovoltaico.
2. Una batería de acumulación.
3. Un regulador de carga.
4. Un inversor.
5. El consumo.

El generador FV es el encargado de transformar la energía del Sol en energía eléctrica. Está formado por varios módulos fotovoltaicos conectados en serie y/o paralelo, y a su vez cada módulo fotovoltaico está formado por unidades básicas llamadas células fotovoltaicas.

La energía producida por el generador FV se acumula, en caso de ser necesario, en un sistema de baterías (los sistemas conectados a la red no las necesitan). Este es un elemento que va a estar cargándose y descargándose cíclicamente. Para controlar los procesos de carga y descarga de la batería se utiliza un regulador de carga. Este elemento es el encargado de proteger la batería contra sobrecargas o contra sobredescargas excesivas que podrían resultar dañinas para la batería, acortando su vida útil. El modo de operación es sencillo: cuando el regulador detecta que la batería está siendo sobrecargada, desconecta el generador FV y cuando detecta que la batería está siendo sobredescargada, desconecta los consumos.

Los módulos FV producen corriente continua (DC), que se puede almacenar directamente en baterías. Cuando se extrae potencia eléctrica de las baterías, ésta también está en forma de corriente continua. En el caso de que se desee dar servicio a determinados consumos que pueden ser en corriente alterna (AC) (como ocurre con la mayoría de los consumos que habitualmente estamos acostumbrados a utilizar) es necesario disponer de un inversor, el cual es un dispositivo electrónico encargado de transformar la corriente continua en corriente alterna con el máximo rendimiento posible.

1.2 El Recurso eólico.

1.2.1 El viento.

Se considera viento a toda masa de aire en movimiento, que surge como consecuencia del calentamiento desigual de la superficie terrestre al incidir sobre ella la radiación solar, estas diferencias térmicas terminan convirtiéndose en la fuente de energía eólica. Como se mencionó anteriormente, la Tierra recibe una gran cantidad de energía procedente del Sol, esto genera que la Tierra opere como un sistema térmico que transforma parte del calor de la energía solar en la energía cinética del viento. Bajo la acción de la presión y las diferencias de densidades, el aire de la atmósfera se desplaza de un lugar a otro a diferentes velocidades, dando lugar al viento. El gradiente de velocidades es mayor cuanto mayor es la diferencia de presiones y su movimiento también viene influenciado por la rotación terrestre.

En general las causas principales del origen del viento son:

1. La radiación solar que es más importante en el Ecuador que en los Polos.
2. La rotación de la Tierra que provoca desviaciones hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur.
3. Las perturbaciones atmosféricas.

Un ejemplo de la circulación general de los vientos, son los vientos Alisios. Al calentarse el aire en el Ecuador asciende y es sustituido por el aire más próximo a los Polos, formándose la llamada circulación de Hadley, que se hace inestable a unos 30° de latitud. Este flujo no se proyecta directamente hacia los Polos debido a la fuerza de Coriolis que aparece como consecuencia del movimiento de rotación de la Tierra, modificando su curso. Esta fuerza depende de la velocidad del viento y de la rotación de la Tierra, por lo que las masas de aire caliente se desplazan por esta circunstancia hacia el Este. La circulación general es semejante y contraria en cada uno de los dos hemisferios, Figura 7, con dirección de Oeste a Este en el hemisferio Norte y viceversa en el hemisferio sur.

El eje principal de este tipo de circulación es una corriente en chorro que se produce por encima de los 10 mil metros a una presión de 300 mbar; se trata de un viento del Oeste que, en el hemisferio Norte, se localiza hacia el paralelo 45°, con velocidades medias de 200 km/hora, pero puede llegar a sobrepasar los 500 km/hora.

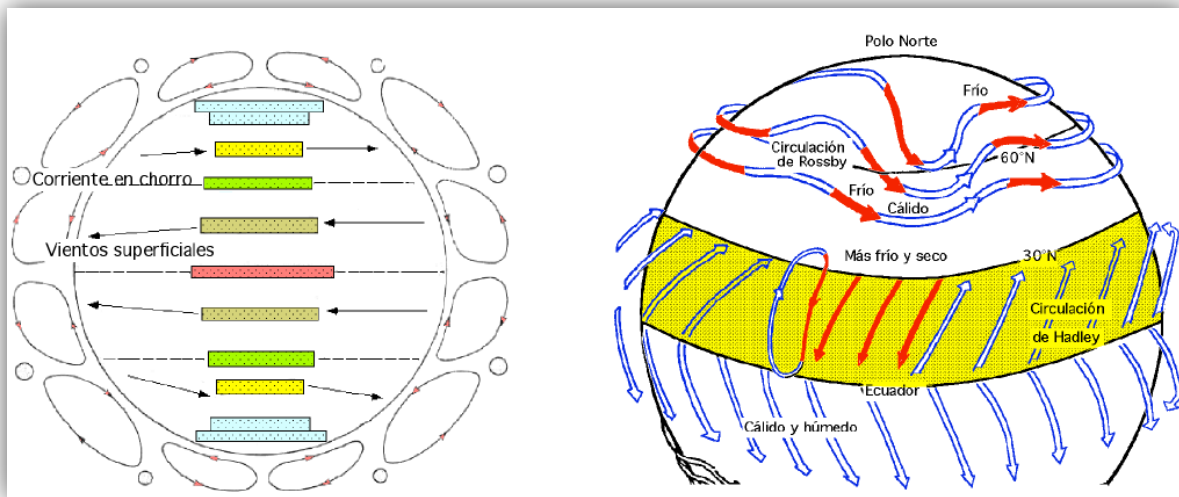


Figura 7. Circulación general del viento en la superficie terrestre [17].

Un esquema de vientos generales es el siguiente [17]:

1. Entre 90°N y 60°N , aire ártico (muy frío) (Circulación de Rossby)
2. Entre 60°N y 40°N , aire polar (frío)
3. Entre 40°N y 5°N , aire tropical (templado)
4. Entre 5°N y 5°S , aire ecuatorial (cálido)

En el límite de estas diferentes masas de aire existen zonas conflictivas o zonas frontales como:

1. El frente ártico: entre el aire ártico y el aire polar.
2. El frente polar: entre el aire polar y el aire tropical.
3. La zona de convergencia intertropical: entre el aire tropical y el aire ecuatorial, en la que soplan vientos del Nordeste (alisios), contorneando el anticiclón de las Azores, (Corriente de Hadley).

Las diferentes masas de aire, así como los ejes de depresión y anticiclónicos, se desplazan según las estaciones en el sentido del movimiento aparente del Sol; en el hemisferio Norte existe, en invierno, una traslación general hacia el Norte, y en verano hacia el Sur. En el hemisferio Sur sucede lo contrario; estos vientos se denominan

monzones.

Un tipo de viento de tipo local característico en las costas son las brisas marinas, vientos costeros originados por la diferencia de temperatura entre el mar y la tierra. Su intensidad depende de muchos factores locales tanto sinópticos. Estos vientos se les denominan brisas térmicas a los vientos que soplan en las zonas de la costa del mar hacia tierra durante el día y de la tierra al mar durante la noche.

El fenómeno se presenta a medida que el Sol asciende, la tierra se calienta más rápidamente que el agua del mar. La tierra va calentando el aire en contacto con ella por lo que asciende y en su lugar viene a ocuparlo el aire del mar que está más frío, originándose un gradiente térmico que, a su vez, origina un gradiente de presión que causa el desplazamiento del aire de la zona de mayor presión - la superficie del mar - al de menor presión - la superficie de la Tierra-, generándose una brisa del mar hacia la tierra que se denomina brisa marina o virazón. Cuando el Sol se oculta, la superficie del mar conserva más tiempo el calor captado durante el día que la tierra, la cual se enfría con más rapidez. Se produce un gradiente térmico y de presión inverso al caso diurno: el aire más caliente del mar se eleva y su lugar pasa a ser ocupado por el aire más frío proveniente de la tierra [18].

No obstante, las condiciones generales de los vientos son modificadas localmente por temporales y gradientes de temperatura originados por los calentamientos desiguales de superficies de tierra y agua o por diversos accidentes orográficos; se puede considerar que los vientos vienen dirigidos por determinados centros de acción de la atmósfera, siendo lo más frecuente que su desplazamiento sea en sentido horizontal.

1.2.2 Energía contenida en el viento.

La cantidad de energía que contiene el viento puede ser determinada si se considera un área imaginaria por el cual pasa y esta área en la vida real puede representar el área de un rotor; esta energía presenta dependencia de tres parámetros básicos: la velocidad del viento incidente, la densidad del aire y el área barrido.

Tomando un volumen de control como se muestra en la Figura 8, se puede observar que el volumen es el producto de una unidad de área por una longitud x , siendo A , el área transversal de un flujo de viento. Para efectos de velocidad, la distancia es igual al

producto de la velocidad por unidad de tiempo:

$$V = xA \quad (1)$$

$$V = vtA \quad (2)$$

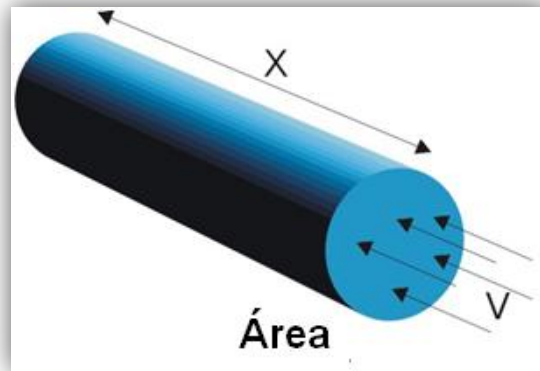


Figura 8. Diagrama de la potencia energética del viento.

Se tiene que la potencia energética del viento es directamente proporcional a la densidad del fluido, al área de la superficie que atraviesa el flujo y al cubo de la velocidad del viento, la cual esta expresada como sigue:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3. \quad (3)$$

donde:

ρ = la densidad del viento en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

A = Área transversal (m^2),

v = Velocidad del viento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

De manera indirecta se tiene que la temperatura de un sitio tiene una influencia importante en la potencia contenida en el aire ya que afecta directamente la densidad del viento, en cuanto a la densidad, la energía contenida en el viento aumenta de forma proporcional a la masa por unidad de volumen de aire, que en condiciones normales (a nivel del mar, a una presión atmosférica de 1 013 mbar y a una temperatura de 15 °C) es de $1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Esto quiere decir que cuando la temperatura del aire descienda aumentando su densidad, mayor energía será transferida al aerogenerador. Por otra parte, cuando el aire se caliente o cuando se asciende en altitud, será menor la energía

cinética que llegue a la turbina, en resumen mientras más denso el aire, más grande la densidad de potencia.

La (3) es válida únicamente para la densidad estándar del aire en condiciones de temperatura y presión atmosférica ideales. Debido a que en un gas la densidad sufre variaciones con los cambios en la temperatura y presión atmosférica, la (3) no es del todo correcta. La densidad del viento ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) depende de la temperatura y de la presión y puede variar de 10% a 15% por temporada. Si se conocen la presión y temperatura del sitio, la densidad del viento puede ser calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{P}{RT}, \quad (4)$$

donde

ρ = la densidad del viento en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,

P = la presión del aire (Pa o $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$),

R = la constante específica de gas del aire ($0.287 \text{ KJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),

T = la temperatura del aire en grados Kelvin ($0^\circ\text{C}+273$).

Sustituyendo (4) en (3) se tiene que la potencia en watts es:

$$P = \frac{1}{2} \frac{\rho}{RT} A v^3. \quad (5)$$

La (5) obtenida muestra la mejor manera de obtener la potencia energética del aire a una velocidad cualquiera, ya que en todo momento contará con la densidad exacta de la velocidad del viento dada.

Debido a las características dispersas y aleatorias del recurso eólico, la forma de estudiar si un emplazamiento es adecuado o no, es utilizando la estadística. Para ello se recurre a la representación de la velocidad del viento como una variable aleatoria con una cierta función de distribución. Normalmente se suele utilizar la distribución de Weibull; esta distribución está en función de dos parámetros: un parámetro de escala c y un parámetro factor de distribución de forma k .

La función de distribución de probabilidades de Weibull está dada por la siguiente expresión:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (6)$$

donde

v = velocidad del viento,

k = factor de forma,

c = factor de escala.

Debido a que los parámetros de forma y escala, k y c , respectivamente; son propios de cada sitio de medición, es necesario determinarlos a partir de los datos experimentales.

Una vez calculada la distribución de Weibull es posible realizar ciertas estimaciones que ayudarán a comprobar los resultados obtenidos de manera experimental, así como llevar a cabo predicciones bajo ciertas condiciones.

Las expresiones básicas que describen las características del viento en un sitio son:

Velocidad media del viento: Representa el valor promedio de la velocidad del viento en $m \cdot s^{-1}$

$$v = c \Gamma \left(\frac{k+1}{k} \right). \quad (7)$$

Velocidad del viento más probable: Este término se refiere a la velocidad del viento ($m \cdot s^{-1}$) con mayor frecuencia para distribución de probabilidades del viento, se expresa mediante:

$$v_{MP} = c \left(\frac{k-1}{k} \right)^{1/k}. \quad (8)$$

Desviación estándar de la velocidad del viento: Indica la dispersión existente entre las velocidades presentes en la distribución de probabilidades de Weibull. Gráficamente nos indica el ancho de la curva

$$\sigma = c \sqrt{\left[\Gamma \left(\frac{k+2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(\frac{k+1}{k} \right) \right]}. \quad (9)$$

Velocidad del viento con máxima carga energética: Es la velocidad del viento ($m \cdot s^{-1}$) que proporciona la mayor cantidad de potencia energética

$$V_{MaxE} = c \left(\frac{k+2}{k} \right)^{1/k}. \quad (10)$$

Densidad de potencia media del viento: Es la cantidad de potencia energética por

unidad de área ($W \cdot m^{-2}$) que el viento puede proporcionar

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(\frac{k+3}{k} \right). \quad (11)$$

1.2.3 Efectos de la rugosidad en el perfil vertical del viento.

Otros parámetros que son importantes para la evaluación del recurso eólico, son los accidentes del terreno suaves como colinas u obstáculos que influyen positivamente en la aceleración local del viento. Por ejemplo, una colina de pendiente suave acelera el viento a lo largo de la pendiente dándose la máxima velocidad en la cima de la loma.

No obstante en la mayoría de casos los obstáculos son edificios y árboles que desvían el viento y producen turbulencias, por lo que deben ser tenidos en cuenta y evitarlos al buscar la mejor ubicación.

Hay dos tipos de obstáculos, los que dejan pasar partes del viento (porosos) y los que no (no porosos).

Obstáculos porosos. Como arbustos, árboles, verjas, vallas, torres de celosía e incluso otros aerogeneradores. En la práctica es casi imposible evitarlos ya que la mayoría forman parte de la naturaleza.

Obstáculos no porosos. Por ejemplo casas, muros y vallas o densas arboladas que no dejan pasar el viento y crean fuertes turbulencias. Estos últimos son evitables en la mayoría de los casos.

El efecto que tienen los obstáculos en el sitio donde se desee aprovechar la energía eólica se le conoce como rugosidad del terreno y se determina como un aumento en la velocidad del viento con la altura respecto al suelo. Existe una relación logarítmica entre la rugosidad y la velocidad del viento con perfiles de viento distintos para cada suelo. Por ello, en general, la velocidad del viento aumenta con la altura. Además, el perfil de velocidad de viento será más pronunciado con el aumento de la rugosidad del suelo [19].

La rugosidad mínima, o de clase 0 se da en medios acuáticos como el mar, mientras que la muy notable de clase 3 implica cercanías de bosques, áreas urbanas, etc. como se muestra en la Figura 9 [19].

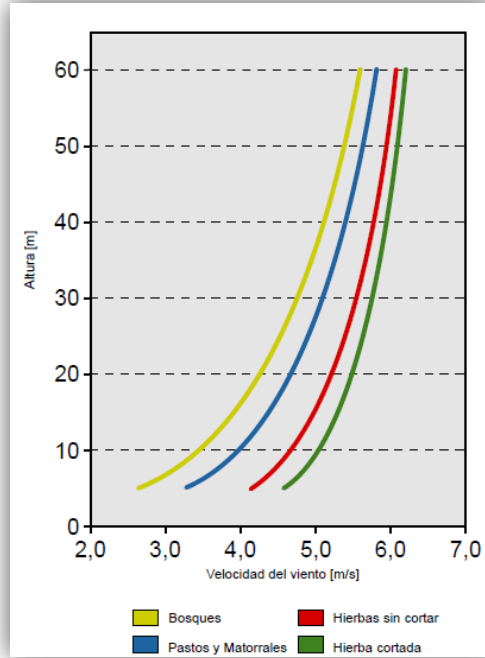


Figura 9. Perfil de velocidades del viento de acuerdo a la superficie medida [17].

Para el estudio de la cizalladura o efectos de los obstáculos en la velocidad del viento observada desde un mástil de medición de la velocidad del viento a dos alturas diferentes, se emplea la ley de potencia empírica [20] mostrada en la (12:

$$u(z) = u(z_r) \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (12)$$

Donde α representa el exponente de la cizalladura o rugosidad de la superficie del viento que se puede calcular con la (13, siempre que se tenga valores de la velocidad del viento a dos alturas diferentes, $u(z)$ y $u(z_r)$.

$$\alpha = \frac{\text{Log} \left(\frac{u(z)}{u(z_r)} \right)}{\text{Log} \left(\frac{z}{z_r} \right)} \quad (13)$$

1.2.4 Estabilidad atmosférica.

La estabilidad es una propiedad del aire que describe su tendencia a permanecer en su posición original, estable, o a elevarse, inestable. La estabilidad de la atmósfera está regulada por la temperatura en diferentes niveles, lo que define el gradiente ambiental de temperatura; el grado de estabilidad se determina a partir de la diferencia de temperatura entre una porción de aire y el aire circundante. Este contraste de temperaturas puede causar el movimiento vertical de la porción (esto es, su elevación o caída). En condiciones estables, el movimiento vertical se inhibe, mientras que en condiciones inestables la porción de aire tiende a moverse continuamente hacia arriba o hacia abajo. Las condiciones neutrales no propician ni inhiben el movimiento del aire después del gradiente de calentamiento. Cuando las condiciones son extremadamente estables, el aire frío cercano a la superficie es “entrampado” por una capa de aire cálido sobre este. Esta condición, denominada inversión, prácticamente impide la circulación vertical del aire. Estas condiciones están directamente relacionadas con los perfiles de las velocidades del viento con respecto a la altura en un sitio determinado.

Es importante tener en cuenta que cualquier cambio de temperatura producido en la porción de aire en la atmósfera se debe a aumentos o disminuciones de la actividad molecular interna. Estas modificaciones se producen adiabáticamente y se deben sólo al cambio de la presión atmosférica provocado por el movimiento vertical de la porción de aire. Un proceso adiabático es aquel en el que no se produce transferencia de calor ni de masa a través de las fronteras de la porción de aire.

En este proceso, la compresión da lugar al calentamiento, y la expansión al enfriamiento.

En este contexto, se considera que el aire es seco ya que el agua que contiene permanece en estado gaseoso.

Por otro lado al elevarse, una porción de aire seco que contiene vapor de agua seguirá enfriándose en el gradiente vertical adiabático seco hasta que alcance su temperatura de condensación o punto de rocío. En este punto, la presión del vapor de agua iguala a la del vapor de saturación del aire y una parte del vapor de agua se comienza a condensar. La condensación libera calor latente en la porción de aire y, por consiguiente, el gradiente de enfriamiento de la porción disminuye.

Condiciones estables. Se produce cuando una porción de aire que empieza a elevarse,

debido a este movimiento ascendente se enfriará hasta que alcance su punto de rocío. Esto implica que a medida que el aire se eleva, el aire más frío se mueve por debajo. La superficie terrestre puede hacer que se caliente y empiece a elevarse nuevamente. Bajo estas condiciones, la circulación vertical en ambas direcciones aumenta y se produce una mezcla vertical considerable. El grado de inestabilidad depende de la importancia de las diferencias entre los gradientes verticales ambientales y los adiabáticos secos.

Las condiciones inestables más comunes se producen durante los días soleados con vientos de bajas velocidades y fuerte insolación. La Tierra absorbe rápidamente el calor y transfiere parte de este a la capa de aire superficial. Si las propiedades térmicas de la superficie son uniformes, es posible que exista una masa flotante de aire, o numerosas porciones de aire si dichas propiedades varían. Cuando el aire se calienta, se vuelve menos denso que el aire circundante y se eleva. Otra condición que puede conducir a la inestabilidad atmosférica es la producción de ciclones (sistema de presión baja), caracterizados por aire ascendente, nubes y precipitación.

Condiciones neutrales. Cuando el gradiente vertical de la temperatura del ambiente es el mismo que el gradiente vertical adiabático seco, la atmósfera se encuentra en estabilidad neutral. Estas condiciones no estimulan ni inhiben el movimiento vertical del aire. La condición neutral es importante porque constituye el límite entre las condiciones estables y las inestables. Se produce durante los días con viento o cuando una capa de nubes impide el calentamiento o enfriamiento fuerte de la superficie terrestre.

Condiciones estables. Cuando el gradiente vertical ambiental es menor que el gradiente vertical adiabático (se enfría a menos de $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}/1.000\text{ m}$), el aire es estable y resiste la circulación vertical. El aire que se eleva verticalmente permanecerá más frío y, por lo tanto, más denso que el aire circundante. Una vez que se retira la fuerza de elevación, el aire que se elevó regresará a su posición original. Las condiciones estables se producen durante la noche, cuando el viento es escaso o nulo.

Estabilidad e inestabilidad condicional. En la discusión previa sobre la estabilidad y la inestabilidad, hemos asumido que una porción de aire ascendente se enfría en el gradiente vertical adiabático seco. Sin embargo, muchas veces la porción de aire se satura (alcanza su punto de rocío) y empieza a enfriarse más lentamente en el gradiente vertical adiabático húmedo. Este cambio en el gradiente de enfriamiento puede modificar las condiciones de estabilidad. La inestabilidad condicional se produce cuando el

gradiente vertical ambiental es mayor que el gradiente vertical adiabático húmedo pero menor que el gradiente seco.

La estabilidad de la atmósfera puede ser cuantificada por medio de la longitud Obukhov [20, 21]. Este parámetro proporciona información sobre las magnitudes relativas de los movimientos de aire vertical originadas mecánicamente por la turbulencia vertical en contra posición a la turbulencia vertical generada térmicamente. La turbulencia generada mecánicamente es el resultado de la rugosidad superficial, mientras que la turbulencia generada térmicamente surge como consecuencia de los gradientes de la densidad del aire y es generada cuando la temperatura del aire y de la superficie son diferentes. La estabilidad atmosférica se puede asignar a una de las cinco clases de estabilidad [20, 21], como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Clases de estabilidad atmosférica en términos de la longitud de Obukhov (L).

Clases de estabilidad	Longitud de Obukhov [m]
Muy estable	$0 < L < 200$
Estable	$200 < L < 1000$
Neutral	$ L > 1000$
Inestable	$-1000 < L < -200$
Muy inestable	$-200 < L < 0$

Un procedimiento para calcular la longitud de Obukhov fue propuesto Businger [22] y Hogstrom [23] en términos del número de Richardson cuando la medición de la velocidad del viento y la temperatura están disponibles.

$$Ri_b = -\frac{g}{T} \frac{z' \Delta \theta_v}{U^2} \quad (14)$$

$$L = \begin{cases} \left(\frac{z'}{Ri_b} \right) & \text{Si } Ri_b < 0 \\ \frac{z'(1-5Ri_b)}{Ri_b} & \text{Si } 0 < Ri_b < 0.2 \end{cases} \quad (15)$$

donde:

z' = altura de medición.

U = velocidad del viento a la altura de medición z' .

$\Delta\theta_v$ = diferencia entre la potencia virtual de temperatura de las dos alturas.

L = longitud de Obukhov.

g = aceleración de la gravedad terrestre.

T = promedio de las temperaturas del aire.

Ri_b = número de Richardson.

Las características de los recursos solar y eólico descritas hasta el momento tienen importancia ya que es vital realizar evaluaciones precisas del potencial en el sitio antes de la implementación de un sistema de generación de energía, tal como muestra los resultados reportados por Notton [24] en el 2011, donde se realizó un estudio de caracterización del recurso solar y eólico; el comportamiento de estos recursos mostraron que se compensan uno al otro en el periodo y sitio de medición, a partir de los resultados obtenidos se realizó una propuesta, diseño y dimensionamiento de las capacidades de los sistemas de generación a instalar en 5 sitios diferentes de la Isla mediterránea de Corsicana: Ajaccio, Calvi, Ersa, Figari y Solenzara. El periodo de evaluación del recurso solar se realizó en un periodo de cinco años, usando promedios mensuales de la radiación solar en el plano horizontal; para el recurso eólico se evaluó por un periodo de 5 años, usando promedios mensuales. Las variables estimadas para el análisis fue la determinación de la radiación global promedio mensual y horaria en el plano de los módulos para cada sitio y velocidad del promedio mensual a través del empleo de la distribución de Weibull para cada sitio. Los resultados permitieron determinar el comportamiento combinado de los patrones del recurso solar y eólico en las cinco zonas de estudio y a partir de esto se desarrolló las propuestas de sistemas de generación a instalar. Se estimó que la implementación de sistemas híbridos en estos sitios depende de la calidad de la energía potencial de los recursos, para los sitios con mucho viento, más del 40% de la producción total es proporcionada por los aerogeneradores, mientras que para los sitios con menos recurso eólico, la contribución sólo representa el 20% de la energía total de la producción. De los cinco sitios estudiados se reportó que todos tienen casi el mismo potencial de energía solar, por lo que la calidad del potencial de la energía eólica afecta directamente a la generación energética. Por lo que un sistema combinado o

sistema híbrido es la mejor opción para todos los sitios considerados en este estudio, ya que proporcionaría un mayor rendimiento si se compara con instalar un sistema fotovoltaico o un solo sistema eólico autónomo.

1.3 Los procesos de térmicos.

Los sistemas de generación de energía que emplean los recursos energéticos descritos, presentan en su operación procesos térmicos y/o procesos de transferencia de calor que pueden tener influencia en su desempeño ya sea en el sistema o en el recurso mismo. En esta sección se describirá los principales procesos térmicos que tienen relación directa con la operatividad de las tecnologías de generación y los recursos descritos.

1.3.1 Los efectos radiativos.

La radiación térmica es la parte de la emisión electromagnética emitida por un cuerpo con longitudes de onda considerablemente cortas. La banda térmica está en el rango que generalmente se considera entre 0.1 y 100 micras. Esta banda de radiación térmica incluye el rango de luz visible que se extiende desde aproximadamente 0.38 hasta 0.76 micras [25].

Consideremos el caso de la transferencia de calor a partir de la energía solar que incide sobre una superficie como muestra la Figura 10, la radiación total que llega a la superficie no se conforma de las componentes de la radiación solar, donde cada componente tiene un porcentaje de transferencia energética.

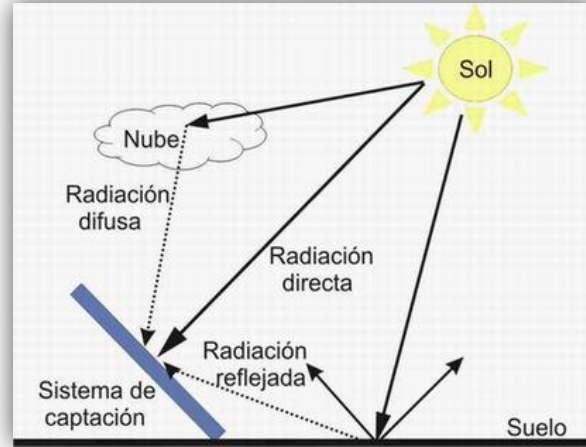


Figura 10. Componentes de la radiación global sobre una superficie.

De donde el balance del total de la energía G que llega al final a la superficie de captación puede ser expresada como:

$$G_{total\ incidente} = G_{componente\ de\ la\ radiación\ directa} + G_{componente\ de\ la\ radiación\ difusa} + G_{componente\ de\ la\ radiación\ reflejada} \quad (16)$$

Aplicando el Principio de Conservación de la Energía en la superficie, (Figura 11), se tiene que:

$$G = G \times \alpha + G \times \rho + G \times \tau \quad (17)$$

donde:

α = absorbancia

τ = transmitancia

ρ = porcentaje de la energía reflejada,

Además se tiene que:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (18)$$

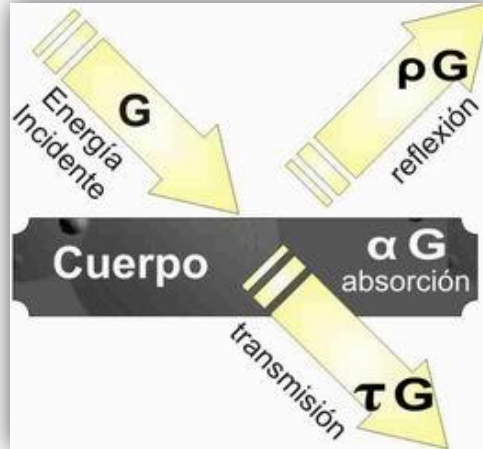


Figura 11. Balance energético en la superficie de un cuerpo.

En general, α , ρ y τ ; dependen de la temperatura del cuerpo, pero para fines prácticos, se pueden considerar como constantes características de cada material.

En las aplicaciones relativas a la energía solar, la distribución espectral de la radiación solar que incide es muy diferente de la distribución de la radiación emitida por las superficies, ya que la primera se concentra en la región de las longitudes de onda cortas y la última en la región infrarroja. Por lo tanto, las propiedades relativas a la radiación de las superficies serán bastante diferentes para la radiación incidente y la emitida, y no se puede suponer que esas superficies sean grises. En lugar de ello, se supone que las superficies tienen dos conjuntos de propiedades: las superficies que se pretende capten energía solar, como las aéreas de absorción de los colectores solares, se desea que tengan valores altos de absorbancia, pero valores bajos de reflectancia, con el fin de maximizar la absorción de la radiación solar y minimizar la emisión de la radiación, para el caso de las superficies que se pretenden que se mantengan frías bajo el sol, como son las exteriores de los tanques de combustible y de los camiones refrigeradores, se desea que tengan precisamente las propiedades opuestas. A menudo se les da a las superficies las propiedades deseadas recubriéndolas con capas delgadas de materiales selectivos.

1.3.2 Los efectos convectivos.

La convección es el término que se usa para describir la transferencia de calor desde una superficie a un fluido en movimiento. En contraposición con la conducción que se presenta cuando existe contacto físico entre dos cuerpos sólidos. La convección implica transporte de energía y de materia, por lo tanto, esta forma de transmisión de calor es posible solamente en los fluidos y es además característica de ellos. Este proceso puede ser clasificado en dos:

La convección natural, donde la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, los cambios de densidad en el fluido como consecuencia del intercambio de energía provocan un movimiento del fluido o flujos de diferente densidad por efectos de la gravedad.

La convección forzada tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor o menor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior puede ser un ventilador, una bomba, el viento, etc. Como la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura [25].

Una revisión rápida de este proceso, se presenta si consideramos la condición de flujo de la Figura 12, donde se tiene un fluido con velocidad V y temperatura T que fluye sobre una superficie de forma arbitraria y de área A_s . Suponiendo que la superficie está a una temperatura uniforme, T_s , y si $T_s \neq T$, entonces ocurrirá un proceso de transferencia de calor por convección.

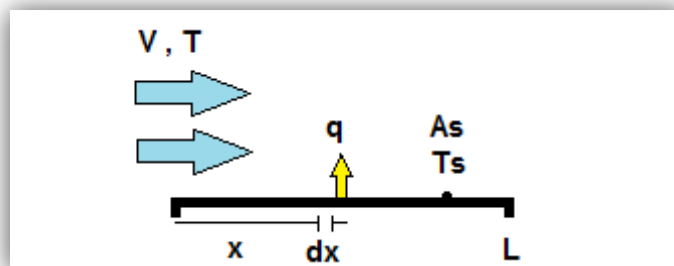


Figura 12. Esquema general del flujo de un fluido sobre una superficie a diferentes temperaturas [25].

En el sistema anterior, el flujo de calor transmitido por convección entre la superficie y el fluido en contacto tiene lugar en dirección normal a la misma y es proporcional a la diferencia de temperaturas existente. Una característica importante en este tipo de procesos es el coeficiente de convección h del fluido, que por lo general es una característica propia a la naturaleza del flujo y del fluido de trabajo.

1.3.3 La conducción térmica.

La transferencia del calor por medio de la conducción se logra a través de dos mecanismos.

El primero es la interacción molecular. Las moléculas de niveles energéticos relativamente mayores (indicados por su temperatura) ceden energía a moléculas adyacentes en niveles inferiores. Este tipo de transferencia sucede en los sistemas sólidos, líquidos o gases y en los que hay un gradiente de temperatura.

El segundo mecanismo de transferencia de calor por conducción es el de electrones "libres" que se presenta principalmente en los sólidos metálicos puros. La concentración de electrones libres varía considerablemente para las aleaciones metálicas y es muy baja para los no metales. La facilidad que tienen los sólidos para conducir el calor varía directamente con la concentración de electrones libres; en consecuencia, se espera que los metales puros sean los mejores conductores de calor. La conducción es principalmente un fenómeno molecular que requiere de un gradiente de temperatura como fuerza motriz.

1.4 La generación fotovoltaica.

1.4.1 Los sistemas Fotovoltaicos.

El efecto fotovoltaico es el proceso físico en el que se convierte la luz solar en electricidad. Una celda fotovoltaica es el dispositivo básico donde se lleva a cabo el efecto fotovoltaico cuando los fotones de la radiación solar inciden en una celda, estas pueden ser reflectadas, absorbidas o pasar a través del material. En el caso de que un fotón sea absorbido, la energía contenida es transferida a un electrón de un átomo del material

semiconductor. Con esta energía el electrón es capaz de romper su enlace asociado con un átomo del material, liberando al electrón que participara en la corriente fotovoltaica.

Módulos y paneles fotovoltaicos. Una celda fotovoltaica es el dispositivo básico capaz de generar un voltaje típico alrededor de 0.5 V (celdas de Silicio) y una potencia máxima de 1 o 2 W. No obstante, para lograr voltajes mayores es necesario conectar un determinado número de celdas idénticas.

La conexión de celdas fotovoltaicas en serie aumenta el voltaje de la configuración, teniendo en cuenta las siguientes observaciones: la corriente de la configuración es la equivalente a la generada por una celda, la potencia de la configuración aumenta proporcionalmente con el número de celdas conectadas en serie.

La conexión de celdas fotovoltaicas en paralelo aumenta la corriente de la configuración, teniendo en cuenta las siguientes observaciones: la corriente es directamente proporcional al número de celdas conectadas en paralelo, el voltaje de la configuración es equivalente al voltaje generado por una celda fotovoltaica y la potencia de la configuración aumenta proporcionalmente con el número de celdas conectadas en paralelo.

Durante la fabricación de los módulos, la interconexión de las celdas une la terminal positiva de una celda con la terminal negativa de la adyacente, posteriormente las celdas son encapsuladas en una estructura de capas tipo “emparedado”.

Una vez montadas las conexiones en los módulos fotovoltaicos, se efectúan los controles de calidad necesarios: bajo condiciones estándares de prueba (irradiancia de $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ y temperatura de celda de 25°C). Cada módulo tiene una curva I-V (o P-V) característica. En la curva de potencia contra voltaje, la potencia máxima (P_{mp}) es la capacidad nominal o tamaño del módulo. La corriente y el voltaje en el punto de máxima potencia (I_{mp} y V_{mp}) corresponden a la corriente nominal y voltaje nominal del módulo, respectivamente. Otros parámetros son la corriente de corto circuito (I_{sc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{oc}). Es importante mencionar que cuando el módulo opera lejos del punto de máxima potencia, la potencia entregada se reduce significativamente.

La Figura 13 muestra el comportamiento de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de la radiación solar. Se observa un aumento proporcional de la corriente producida con el aumento de la radiación. También se puede observar que el voltaje a circuito abierto, no cambió, lo cual demuestra que los cambios en la radiación

afectan principalmente a la corriente de corto circuito.

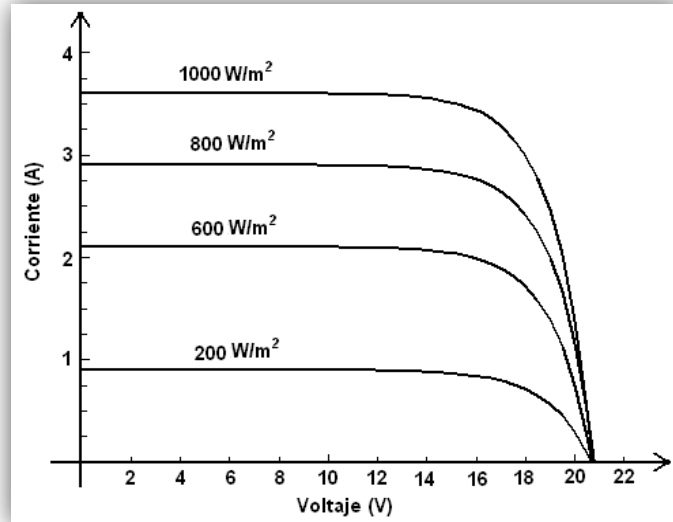


Figura 13. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de radiación (temperatura constante de 25°C) [16].

En la Figura 14 se muestra el efecto que produce la temperatura en la generación eléctrica de los módulos fotovoltaicos en forma similar para el caso de las celdas fotovoltaicas. La potencia nominal se reduce en promedio 0.5% por cada grado centígrado por encima de 25°C [16].

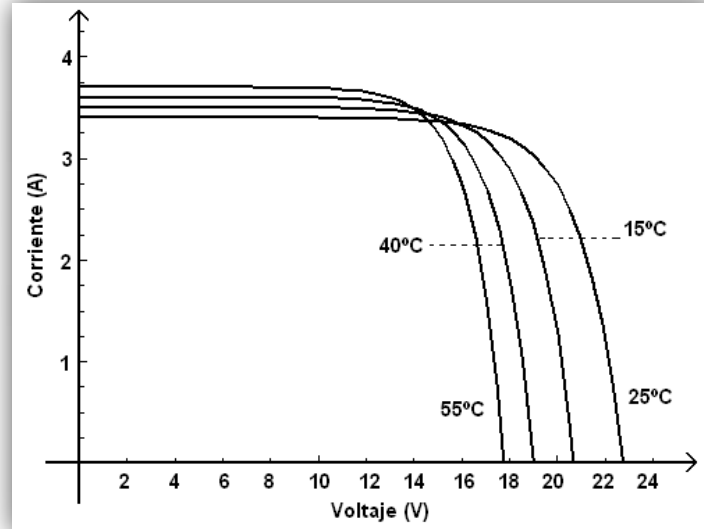


Figura 14. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes temperaturas de operación (irradiancia constante 1,000 W/m²) [16].

Conforme los sistemas se vuelven más complejos, es necesario definir arreglos y sistemas que permitan identificar unos de otros, en la Tabla 2 se presentan estos conceptos:

Tabla 2. Clasificaciones de las configuraciones en arreglos y sistemas fotovoltaicos.

Clasificación	Descripción
Panel fotovoltaico	Conjunto de módulos fotovoltaicos conectados en serie y/o paralelo, para aumentar la potencia disponible.
Arreglo fotovoltaico	Conjunto de paneles fotovoltaicos conectados para cubrir los requerimientos energéticos de una aplicación.
Sistema fotovoltaico	Integración de varios componentes como generación, distribución y almacenamiento de la energía fotovoltaica.

En la mayoría de los casos la generación y la demanda de energía no coinciden en forma temporal por lo que será necesaria la instalación de los sistemas fotovoltaicos con las características propias según las aplicaciones y las necesidades del lugar. En general se puede distinguir dos tipos principales de sistemas fotovoltaicos: los sistemas autónomos y

los sistemas conectados a la red eléctrica pública.

Los sistemas autónomos se subdividen en sistemas con o sin almacenamiento de energía y sistemas híbridos, que por lo general se instalan en zonas remotas sin acceso a la red eléctrica.

Los sistemas autónomos y/o aislados sin baterías generalmente se conectan a las cargas de corriente directamente, en su mayoría son usados para alimentar bombas de extracción de agua para los sistemas de riego.

Los sistemas con almacenamiento de energía, usualmente emplean bancos de baterías para acumular temporalmente la energía y poder satisfacer la demanda de las cargas cuando éstas sobrepasan a la generación del arreglo fotovoltaico o cuando no existe generación y es imprescindible el flujo eléctrico.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica pública tienen como finalidad inyectar en la red la energía eléctrica excedente producida por el arreglo fotovoltaico. Este tipo de configuraciones tiene la ventaja de no requerir sistemas de almacenamiento, ya que la red actúa como receptora de la electricidad generada y además permite distribuirla hasta los puntos de consumo, que pueden ser muy lejanos del lugar generación.

Como se había mencionado en párrafos anteriores, el comportamiento de estos sistemas de generación eléctrica depende de las condiciones medioambientales en las que son instaladas, tal como se muestra en el trabajo desarrollado por Jun Hung So [26] en el 2008, reportando la valuación cuantitativa del desempeño de un sistema fotovoltaico conectado a red sometido a las variaciones de las condiciones meteorológicas en Corea del Sur, en este proyecto se estudió un sistema fotovoltaico estático de tecnología de Silicio policristalino con una capacidad instalada de 3KW, el estudio se realizó en el periodo de enero a diciembre de 2004, las variables monitoreadas fueron: la corriente en CD, voltaje en CD y la radiación solar en el plano de los módulos con una frecuencia de monitoreo de 1 segundo con promedios de 1 minuto. Los resultados de este trabajo permitió determinar la potencia promedio mensual del sistema de generación fotovoltaica en función del recurso solar presente, estimar las pérdidas en el rendimiento mensual y diario del sistema PV debido factores como sombreado (suelo, nieve, variación de radiación, etc.), desajuste, las pérdidas de PCS, etc., además se determinó que si el

sistema de energía fotovoltaica y los componentes instalados fuesen los optimizados, el sistema puede mejorar su rendimiento en un 7% o más.

1.5 La generación eólica.

1.5.1 Los aerogeneradores.

El principio de operación de un aerogenerador se basa principalmente en captar la energía cinética del viento por medio de su rotor aerodinámico y transformarla en energía mecánica que concentra sobre su eje de rotación o flecha principal. Esta energía mecánica generalmente es acondicionada mediante una caja de engranes (valores de torque y velocidad) antes de ser transmitida al eje de un generador eléctrico para la producción de electricidad.

Los principales subsistemas que conforman un aerogenerador son el sistema captación (rotor y las aspas), el sistema de transmisión, el sistema de orientación al viento, el sistema de generación, el sistema de control y regulación de potencia y finalmente, el de soporte (el chasis principal y la torre).

Los generadores eólicos han sido estudiados por el hombre en forma intensiva y dentro de su clasificación existen diferentes tipos que van desde sistemas de pequeñas potencias, a las grandes máquinas americanas y alemanas de varios Mega watts. Otra clasificación de estos sistemas toma como referencia la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento.

En los aerogeneradores de eje horizontal, para obtener en las palas una velocidad angular regular y uniforme, para una determinada velocidad del viento es necesario que tanto la dirección del viento, como su velocidad, se mantengan constantes con respecto a las palas.

Por el contrario, en los aerogeneradores de eje vertical, manteniendo las mismas condiciones regulares en la velocidad del viento y en la velocidad angular de las palas, resulta que éstas pueden estar sometidas a un viento aparente de dirección y velocidad continuamente variables, por lo que en estas máquinas, el flujo aerodinámico resulta complicado.

En general los aerogeneradores los podemos clasificar como sigue:

1. Aerogeneradores de eje horizontal y de eje vertical (Figura 15)
2. Sistemas giromill (eje vertical y palas verticales, con o sin distribuidor)
3. Sistemas especiales.

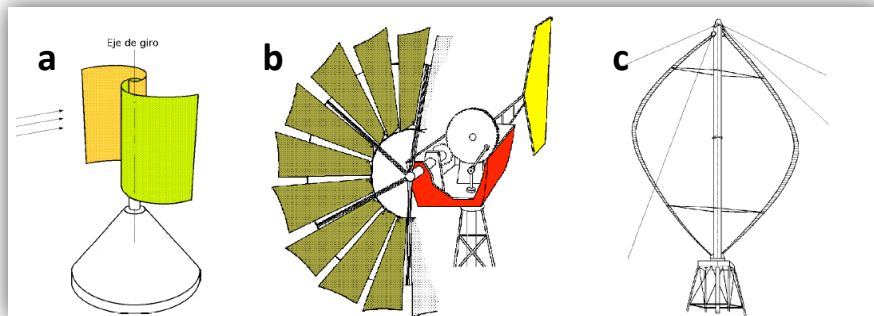


Figura 15. Aerogeneradores (a) Rotor Savonius, (b) Molino multipala y (c) Aerogenerador Darrieux.

No obstante los aerogeneradores de eje horizontal se encuentran más desarrollados, tanto desde el punto de vista técnico como comercial.

Generadores eólicos de eje horizontal. Los Aerogeneradores de eje horizontal se suelen clasificar según su velocidad de giro o según el número de palas que lleva el rotor, aspectos que están íntimamente relacionados, en rápidas y lentas; las primeras tienen un número de palas no superior a 4 y las segundas pueden tener hasta 24.

Los principales tipos de aerogeneradores de eje horizontal, son:

1. Máquinas que generan un movimiento alternativo, que se utilizan para el bombeo de agua.
2. Máquinas multipala.
3. Hélices con palas pivotantes (ángulo de ataque variable).
4. Hélices con palas alabeadas, muy sofisticadas, que incluyen clapetas batientes y alerones de ángulo variable.

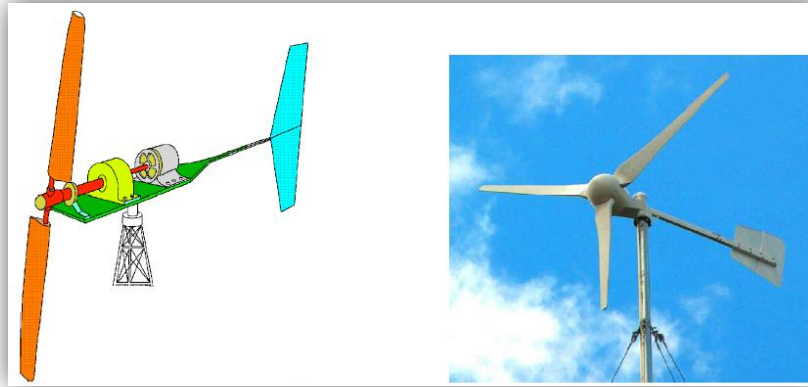


Figura 16. Aerogeneradores clásicos de hélice.

Los aerogeneradores de eje horizontal tipo hélice (Figura 16), constan de una aeroturbina, de una góndola o navecilla que contiene al generador eléctrico, dinamo o alternador, conectada al sistema de acoplamiento que puede ser a su vez multiplicador del número de revoluciones proporcionadas por la hélice y al sistema de control y orientación; todo esto se monta sobre una torre.

La hélice puede presentar dos tipos de posiciones frente al viento, como son:

1. Barlovento (upwind), en la que el viento viene de frente hacia las palas, teniendo el sistema de orientación detrás, aguas abajo.
2. Sotavento (downwind), en la que el viento incide sobre las palas de forma que éste pasa primero por el mecanismo de orientación y después actúa sobre la hélice.

Generadores eólicos de eje vertical. Entre los aerogeneradores de eje vertical se pueden citar:

1. El aerogenerador Savonius Figura 15 (a) que puede arrancar con poco viento, siendo muy sencilla su fabricación; tiene una velocidad de giro pequeña y su rendimiento es relativamente bajo.
2. El aerogenerador Darrieux o de catenaria Figura 15 (b), requiere para un correcto funcionamiento, vientos de $4 \text{ a } 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ como mínimo, manteniendo grandes velocidades de giro y un buen rendimiento; se construyen con 2, 3 y 4 láminas.
3. El molino vertical de palas tipo giromill o ciclogiro que deriva del Darrieux; tiene entre 2 y 6 palas.

Las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal, son:

1. No necesitan sistemas de orientación.
2. Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo.
3. No requieren mecanismos de cambio de revoluciones, por cuanto no suelen emplearse en aplicaciones que precisen una velocidad angular constante.

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal respecto de los de eje vertical son:

1. Mayor rendimiento.
2. Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos).
3. Menor superficie de pala (S) a igualdad de área barrida (A).
4. Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa.

Otra clasificación de los sistemas de generación eólica es de acuerdo a su capacidad nominal, existe una clasificación de aerogeneradores la cual se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de aerogeneradores de eje horizontal para producción eléctrica en función de su potencia [17].

Denominación	Potencia nominal [kW]	Radio del rotor [m]	Aplicaciones
Muy baja	< 1	< 1	Embarcaciones, sistemas de comunicación, refugios de montaña, iluminación
	1-10	1-3	Granjas, viviendas aisladas (sistemas Eólico-fotovoltaico), bombeo...
Baja	10-100	3-9	Comunidades de vecinos, PYME's (sistemas mixtos Eólico-diésel), drenaje, tratamiento de aguas...
Media	100-1 000	9-27	Parques eólicos (terreno complejo)
Alta	1 000-10 000	27-81	Parques eólicos (terreno llano, mar adentro)
Muy alta	>10 000	>81	En fase de investigación y desarrollo, requieren nuevos diseños y materiales no convencionales. Suponen un salto tecnológico.

Los aerogeneradores de baja o pequeña escala, como el mostrado en la Figura 17,

generalmente son empleados para alimentar cargas aisladas de las redes eléctricas convencionales o cargas específicas. La mayoría de las veces cuentan con otro sistema de generación eléctrica tales como sistemas fotovoltaicos o generadores diesel, dando lugar a combinaciones que hoy en día se conocen como sistemas híbridos, y cuya energía eléctrica producida generalmente es almacenada en un banco de baterías.



Figura 17. Aerogenerador pequeño para aplicaciones aisladas.

Los aerogeneradores de gran escala, por ejemplo los presentados en la Figura 18 son máquinas que por su capacidad de producción se conectan a la red eléctrica convencional, generalmente en conjunto, formando así una central eolieléctrica o parque eólico.



Figura 18. Aerogenerador de gran escala (1.5 MW) para centrales eoloelectricas.

1.5.2 Ley de Betz y las curvas de potencia.

Ley de Betz. Determina la cantidad máxima de energía que es posible extraer del viento ya que no toda puede ser capturada y extraída por el aerogenerador, de ser así se supondría que la velocidad de salida es nula, y por ende el aire no podría abandonar el sistema, pero entonces el aire tampoco podría entrar al mismo.

Tampoco sería posible suponer que toda la energía del viento pase por el rotor sin que éste represente una barrera, puesto que tampoco se extraería energía alguna. Es evidente entonces, que existe un límite entre estos dos extremos y que representa la cantidad máxima de energía que un sistema aerogenerador puede extraer de la energía disponible en el viento, a este límite teórico, se le conoce como el límite de Betz.

El límite de Betz representa una ley fundamental para la aerodinámica de los aerogeneradores; fue formulada por primera vez en 1926 por el físico alemán Albert Betz en su libro "*Wind Energie*" y afirma que un aerogenerador puede convertir hasta 59% de la energía disponible en el viento en energía mecánica.

Curva de Potencia. La Curva de Potencia es un gráfico que indica la potencia eléctrica que entrega el sistema a diferentes velocidades del viento. De esta curva, Figura 19,

destacan los siguientes valores:

Velocidad inicial, V_i , (Cut in Wind Speed): Velocidad del viento a la cual el aerogenerador empieza a producir energía eléctrica.

Velocidad nominal, V_n , (Rated Wind Speed): Velocidad del viento a la cual el generador eléctrico alcanza su potencia nominal.

Velocidad de salida, V_s , (Cut out Wind Speed): Velocidad del viento a la cual el generador tiene que ejecutar un paro forzado para no operar sobre los límites máximos de su diseño.

Velocidad de supervivencia, V_{ss} , (Survival Wind Speed): Velocidad del viento arriba de la cual el generador puede sufrir daños permanentes aunque se encuentre frenado.

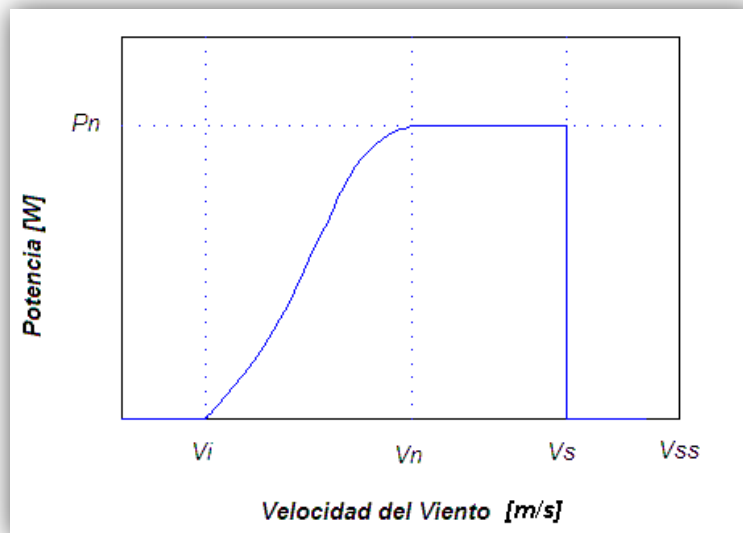


Figura 19. Curva de potencia característica de un Aerogenerador.

1.6 Los sistemas híbridos de generación eléctrica.

1.6.1 Clasificación de los sistemas híbridos.

Cuando nos referimos a un sistema híbrido, estamos hablando de la unión de dos o más sistemas de generación de energía eléctrica para garantizar la continuidad del servicio eléctrico de una demanda específica. Esta combinación de distintas fuentes puede incluir tanto los sistemas convencionales como las fuentes renovables, complementadas con

sistemas de almacenaje como baterías, sistemas de acondicionamiento de potencia, reguladores de carga, y de control.

En algunos casos los sistemas combinados emplean exclusivamente fuentes renovables, es decir que combinan las tecnologías fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica, maremotriz, etc. Estos sistemas permiten la autosuficiencia de la red eléctrica, ya que combinan una fuente continua, para cubrir la necesidad energética de base, en este caso la pequeña central hidroeléctrica, y una o más fuentes intermitentes, para cubrir los picos de potencia solicitada.

Los beneficios desde el punto de vista ambiental de los sistemas híbridos son notables: servicio a zonas aisladas, actuación de una política de regionalización de la producción, contribución a la diversificación de las fuentes, disminución de la dependencia energética de fuentes convencionales de la zona afectada por el proyecto, y disminución de emisiones de sustancias contaminantes y causantes del efecto invernadero.

No obstante, los sistemas híbridos pueden tener impactos negativos sobre el medio ambiente, impactos que el proyectista o constructor tendrá que intentar minimizar. Estos están relacionados sobre todo con la ocupación del terreno, la transformación del territorio, la derivación y captación de recursos hídricos superficiales y posibles alteraciones sobre la flora y la fauna, aunque son de mucho menor impacto que los sistemas convencionales de gran tamaño. En aplicaciones situadas cerca de los centros urbanos, es necesario programar actuaciones que reduzcan los ruidos y las vibraciones producidas por las máquinas.

En la gran mayoría de los trabajos enfocados al estudio de los sistemas híbridos tienen la tendencia de facilitar, simplificar y optimizar el desarrollo de los diseños, construcción, operación y mantenimiento de éstos. El empleo de la simulación por medio de software es una tendencia muy difundida. Entre los primeros trabajos desarrollados sobre los sistemas híbridos en México por Solís [27] del IIE, propuso una metodología donde pretende dar una visión de las principales actividades que más impacto tienen en el diseño y desarrollo de los sistemas híbridos, así como la identificación de las variables, las principales características y formas de validación a través de la integración de una metodología de simulación por software. Otros trabajos presentan enfoques diferentes, tal es el caso desarrollado en Omán [28], en el que se demuestra la viabilidad de la implementación de

los sistemas híbridos eólico- fotovoltaico a través de la utilización de la energía eléctrica en una actividad de vital importancia, como la desalinización del agua de mar para la irrigación de invernaderos; obteniéndose que el 98% del agua dulce producida por la planta desalinizadora se logra en el intervalo de mayor presencia de los recursos eólico y solar. Otros estudios demuestran que la implementación de estos sistemas a una mayor escala en plantas de generación de electricidad solar y eólica, tienen un mayor costo beneficio al emplear de forma complementaria estas fuentes renovables [29].

Otras líneas de investigación tienen un enfoque en la optimización del dimensionamiento de las instalaciones individuales o combinadas de las tecnologías. En estos casos la importancia de conocer las características del recurso en el sitio es vital; tal como se muestra en el trabajo desarrollado en la India en 1982 [30], donde se obtuvo para la zona de estudio, el recurso caracterizado posee los siguientes patrones: durante las temporadas de baja insolación, la velocidad del viento es generalmente más alta y viceversa; sin embargo, para el aprovechamiento y rendimiento óptimo del sistema híbrido es importante un adecuado dimensionamiento de cada subsistema de generación, esto se logró con su optimización y un ajuste a los costos y determinados criterios de fiabilidad.

En el 2007, se reportó el análisis del desempeño operativo de un sistema híbrido PV-viento-sistema de hidrógeno cuando es sometido diferentes condiciones de velocidad de viento y radiación solar [31], este trabajo se llevó a cabo en Kuala Terengganu, en la costa Este de la Península de Malasia. El sistema experimental fue un sistema híbrido compuesto por un arreglo FV de Silicio amorfo de 1KW, un aerogenerador de 1 KW regulado a 24 VCD, un banco de baterías de 1000 Ah, un electrolizador PEM de Stack de 10 celdas de 1KW a 40 A. La evaluación se llevó a cabo por un periodo de medición entre septiembre –marzo y de abril-agosto de 2006, se reportó el análisis de los días 15 de agosto y el 18 de noviembre, la frecuencia de monitoreo fue de 10 min; se midió la velocidad y dirección de viento, temperatura ambiente y de los módulos, voltaje y corriente del arreglo FV, banco de baterías y del generador eólico y la radiación Global. Se estimó el comportamiento los voltajes y corrientes máximos del sistema PV y del banco de Baterías, la potencia de salida del aerogenerador, la capacidad de almacenamiento y cantidad de Hidrogeno a generar. Los resultados permitieron determinar la eficiencia de los sistemas que conforma el sistema híbrido, determinar la producción de hidrogeno. Concluyendo que no existen problemas técnicos asociados con la producción de

hidrógeno con sistemas híbrido fotovoltaico-eólico-electrolizador, la implementación de los sistemas híbridos son factibles y fiables, y requieren menos mantenimiento que los sistemas convencionales; la tecnología de los electrolizadores parece ser lo suficientemente maduros para la aplicación en sistemas híbridos, los efectos electroquímicos de la operación en los períodos con generación de fuentes de energía intermitentes se pueden solucionar mediante el uso de un banco de baterías como un búfer antes de suministrar energía al sistema de electrólisis.

1.6.2 El sistema híbrido solar – eólico.

Uno de los problemas del empleo de los recursos solar y eólico en forma individual es su discontinuidad: un sistema energético solar por sí solo no puede proporcionar una fuente de energía continua debido a la baja disponibilidad del recurso en los periodos nocturnos o de poca luz, (en invierno). En el caso de los sistemas eólicos no pueden satisfacer una demanda de carga constante debido a la variabilidad de las velocidades del viento de una hora a otra.

La combinación de los recursos solar y eólico en plantas de potencia híbridas permiten amortiguar el efecto de la variabilidad del comportamiento de los recursos presentes. La decisión de la implementación de los sistemas híbridos depende del tipo de carga a satisfacer ya que el objetivo es producir una energía equivalente a la demanda. En muchos casos es deseable determinar si los dos recursos combinados permiten satisfacer la carga eléctrica en cuestión, para lo cual es necesario evaluar el comportamiento mensual, comportamiento horario en un mes, y así mismo el comportamiento anual.

Lo expuesto anteriormente, puede verificarse en un trabajo experimental publicado en el 2010, donde se reportó la caracterización y desempeño a largo plazo de sistema un sistema híbrido FV-eólico. Este trabajo se realizó en Soria, España [32], el sistema evaluado fue un sistema FV de Silicio Policristalino con una capacidad de 5.04 KW, un aerogenerador de 10KW y un generador diesel de 20KW; el periodo de medición fue entre enero y diciembre de 2002, con una frecuencia de muestreo de 1 segundo y promedios de 1 minuto. Las variables medidas fueron: velocidad y dirección de viento, temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar en el plano de los módulos, voltaje y corriente del arreglo FV, del aerogenerador y del generador diesel. Las variables que fueron

estimadas para el análisis: la potencia del viento, la contribución energética de cada sistema y el balance energético en el periodo. Los resultados permitieron determinar las pérdidas energéticas en los sistemas de generación, calcular la eficiencia de cada subsistema y evaluar el desempeño en el periodo del sistema. En conclusión el sistema de generación eólica presenta un mejor desempeño con respecto al sistema de generación fotovoltaica para el sitio de estudio, esto debido principalmente a pérdidas de diversa índole asociadas a los sistemas, se propone tiempos de medición de los sistemas de generación eólica de acuerdo a su tamaño para incluirlos en las normas de estos sistemas, sugiriendo promedios de 10 min para sistemas grandes o de gran potencia y promedios de 1 minuto para pequeñas turbinas.

Ese mismo año, 2010, se reportó otro trabajo sobre el estudio de factibilidad en la instalación de sistemas híbridos como fuentes renovables de generación de energía para aplicaciones conectadas a la red en tres ciudades de Irak [33]: Bagdad, Basrah y Mosul. El sistema evaluado consistió en un arreglo FV de silicio monocristalino con una capacidad instalada de 5 MW, 100 aerogeneradores con una capacidad instalada de 1MW, por lo que la capacidad nominal del sistema híbrido fue de 6MW y finalmente las cargas eléctricas para el estudio consistió en 750 casas con un consumo promedio de 30 KWh/día por casa. En lo que respecta al periodo de medición se tomaron datos de 8 años de estaciones meteorológicas cercanas al sitio, trabajando al final con los promedios mensuales. Variables medidas fueron la velocidad y dirección de viento, la radiación global en el plano horizontal; las variables estimadas para el análisis fue la corriente y voltaje de operación teóricas del arreglo FV, la radiación en el plano de los módulos FV, generación anual de los sistemas eólicos y fotovoltaicos. Los resultados de este trabajo determinó la contribución eléctrica a la red de cada subsistema de generación, se determinó los patrones de variación del recurso solar y eólico en la región; también se obtuvo que la potencia de salida de los módulos de PV fue mayor en Basora, seguido de Mosul y Bagdad, respectivamente, mientras que la salida de potencia de los aerogeneradores fue mayor en Basora, seguida de Bagdad y finalmente Mosul, al final se determinó que la potencia más alta inyectada a la red fue de Basora. En conclusión se tiene que la ubicación de un sistema híbrido puede afectar fuertemente el rendimiento de la planta es decir, en este caso, la instalación del sistema propuesto en Bagdad, en lugar de Basora conducirá a una disminución de la potencia total obtenida por el 15%, esto si

antes no se evalúa la disponibilidad y el comportamiento de los patrones de los recursos presenten en el sitio.

En el caso de los sistemas híbridos autónomos, Figura 20, con almacenamiento o banco de baterías, representan una opción para la alimentación de pequeñas cargas en sitios remotos donde sea factible explotar en forma paralela los recursos eólico y solar. El dimensionado de un sistema híbrido es importante y necesario para identificar todas las combinaciones posibles que ofrezcan cierto nivel de satisfacción o fiabilidad en la generación del flujo eléctrico demandado.

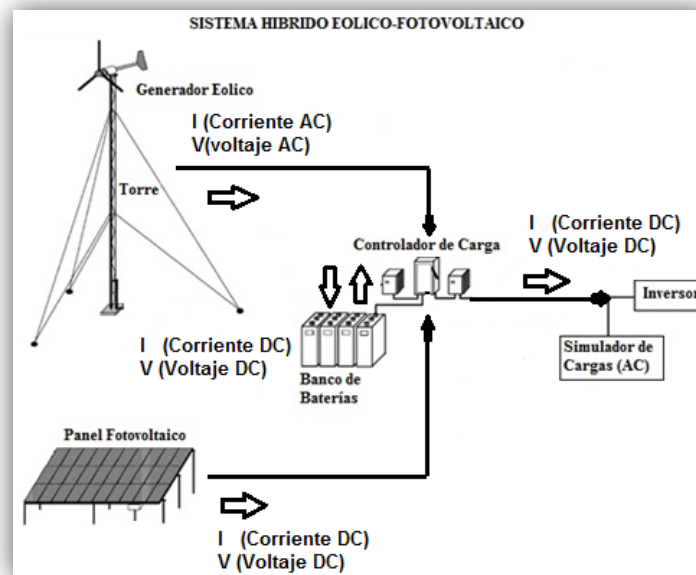


Figura 20. Esquema general de un sistema híbrido autónomo eólico-fotovoltaico.

Para dimensionar un sistema híbrido autónomo como el mostrado en la Figura 20, es importante en todos los casos tener una serie de ecuaciones que nos permitan ligar los datos meteorológicos como la velocidad de viento, la radiación solar y temperaturas de un emplazamiento, con el tamaño de cada elemento o subsistema de generación, arreglo fotovoltaico, aerogenerador y banco de baterías.

Como se había mencionado, los sistemas híbridos pueden ser optimizados en su

dimensionamiento, por lo que los sistemas híbrido eólico-fotovoltaico-batería pueden ser analizados con este enfoque incorporando al mismo tiempo un análisis de su rendimiento cuando es sometido a una carga típica; en el 2010 se reportó los resultados de un trabajo cuyo objetivo fue caracterizar el comportamiento de los recursos solar y eólico en la zona, y a partir de los resultados definir la configuración y capacidad de generación de la instalación de un sistema híbrido. La investigación se llevó a cabo en una comunidad de Sitakunda [34] en Bangladesh. El sistema propuesto para analizar fue un arreglo fotovoltaico de 1KW, un aerogenerador de 3KW e instalado a 20m, un banco de baterías de 225 Ah. Se realizaron mediciones de la velocidad y dirección del viento a 30m de altura en el periodo de enero a diciembre de 2006 con muestreos de 10 minutos; con respecto al recurso solar se realizaron estimaciones usando datos de la radiación solar global en el plano horizontal provenientes de estaciones meteorológicas cercanas al sitio en el periodo de 1981a 2003, con esta información se realizaron estimaciones de la radiación global en el plano de los módulos, las velocidad de viento en el sitio a partir de la distribución de Weibull, y las cargas de consumo se determinaron por las cargas típicas diarias de una casa representativa de la zona. Resultados del trabajo permitió determinar el comportamiento de los patrones del recurso solar y eólico en el sitio, se determinó la configuración óptima de cada subsistema de generación en Sitakunda, esta optimización del sistema híbrido viento-PV-batería permite que el sistema instalado pueda satisfacer la demanda de electricidad de la comunidad local adecuadamente con un costo de USD 0.363/kWh. Por otro lado los sistemas híbridos eólico-solar-batería reducen el costo de generación del 78% y 45%, respectivamente, en comparación con los sistemas eólicos-batería y PV-batería.

De todo lo expuesto se puede establecer que la implementación de sistemas híbridos eólico-solar tiene dependencia con la disponibilidad del recurso, sus patrones de cíclicos y de la fiabilidad de los sistemas de medición utilizados para evaluar estos recursos. Para el caso de la Península de Yucatán, la radiación solar y el recurso eólico se han estado realizado estudios preliminares de evaluación [6, 7, 12], así como el estudio de la generación e implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos y sistemas eólicos de generación independiente.

A continuación se presenta el desarrollo experimental de la implementación y análisis de un sistema de generación de energía eléctrica a través de sistema híbrido solar-eólico con

un sistema de almacenamiento de baterías, en las condiciones medioambientales de la región tropical de la Península de Yucatán.

CAPITULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

1.7 Ubicación del sistema de generación híbrido solar-eólico.

El sitio de estudio se encuentra ubicado en la ciudad de Mérida en el norte de la Península de Yucatán, véase Figura 21, en la azotea y alrededores del Laboratorio de Energía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.



Figura 21 Ubicación geográfica del sitio de mediciones en el noroeste de la Península de Yucatán, México.

La península de Yucatán tiene una orografía predominantemente plana, el sitio de medición se encuentra a unos 25 km de la costa norte y a una altura de casi 7 metros sobre el nivel del mar (msnm). La Tabla 4 muestra los parámetros geográficos principales de la zona de medición.

El sistema híbrido de estudio, Figura 22, fue instalado en el Laboratorio de Energía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán:

Tabla 4. Parámetros geográficos del sitio de medición.

Parámetros del sitio.	Valores.
Coordenadas geográficas.	21°02'55.69" N, 89°38'36.68" W
Altura del sitio.	7msnm
Distancia a la costa más cercana.	25.3km (dirección Norte)



Figura 22 Sistema híbrido solar-eólico.

Ciudad: Mérida, Yucatán.

Tipo de Clima: Tropical.

El sistema híbrido está compuesto por los subsistemas descritos en los siguientes apartados.

1.7.1 Generador fotovoltaico.

El arreglo fotovoltaico es un sistema pasivo instalado con un ángulo de inclinación de 21 grados con respecto a la horizontal y orientado hacia el hemisferio Sur, compuesto por módulos de tecnología de silicio monocristalino ver Figura 23.

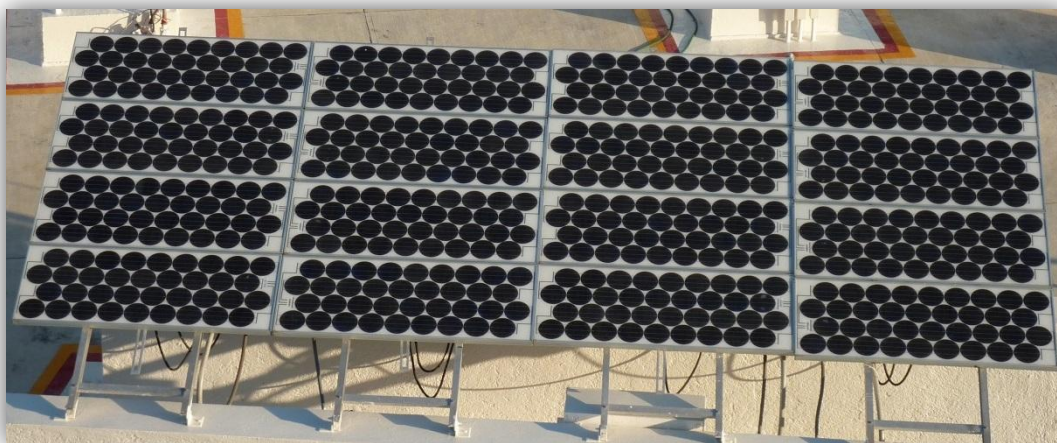


Figura 23. Arreglo fotovoltaico estático de Silicio monocristalino de 1.6 KW.

El sistema de generación fotovoltaica está integrado por un conjunto de módulos fotovoltaicos de 100W cada uno, y configurada en cuatro arreglos conectados en serie con una capacidad nominal instalada de 1.6Kw. En la Tabla 5 se enlista las características técnicas operativas y de configuración de este subsistema de generación de energía.

Tabla 5. Características técnicas del arreglo fotovoltaico estático de Silicio monocristalino de 1.6 KW.

Sistema		Arreglos		Módulos	
Potencia	1.6 KW	Potencia	400W	Marca	Siemens
Corriente	32 Ampere	Voltaje	48 VCD	Modelo	SR 100
Voltaje	48 VCD	Corriente	8 Ampere	Potencia	100 W
Total de módulos	16	Módulos en serie	4	Voltaje	12 VCD
Arreglos en paralelo	4			Corriente	8 Ampere

1.7.2 Generador eólico.

El sistema de generación eólica está compuesto por un aerogenerador Bergey BWC-1500, Figura 24, clasificada como una turbina de viento de eje horizontal, (HAWT, por sus siglas en inglés) de pequeña escala, tripala y barlovento, cuenta con un sistema auto direccional mediante el mecanismo de cola y el sistema de “furling” o doblamiento de cola que permite el control de su velocidad, se encuentra instalada a 33.22 metros de altura sobre el nivel del suelo y 4 m.s.n.m.



Figura 24. Aerogenerador Bergey de 1.5 KW: (izquierda) diagrama de instalación, (centro) vista general de la torre de instalación y (derecha) vista del aerogenerador.

En cuanto a las especificaciones técnicas operativas de este aerogenerador se describen en la

Tabla 6, el sistema empieza a generar cuando la velocidad del viento es alrededor de $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y alcanza su potencia nominal a la velocidad de $12.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, la protección de este sistema se activa cuando la velocidad de viento llega $13.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tabla 6. Generador Bergey Windpower de 1.5 KW.

Configuración General	
Marca, Modelo, Numero de Serie	Bergey Windpower Company, BWC-1500, BWC 1500-48
Eje de rotación	Horizontal
Orientación	Viento arriba
Número de palas	3
Diámetro del rotor	3.05 m
Altura del cubo	33.22 m
Sistema de Posicionamiento	Cola móvil
Peso	76 kg
Temperatura de operación	-40°C a 60°C
Torre (Altura ,Tipo)	33 m, Celosía
Funcionamiento	
Potencia eléctrica nominal	1500 W
Velocidad de inicio	$\approx 3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Velocidad nominal	$12.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Velocidad de salida	N/A
Velocidad de "furling"	$13.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Velocidad de Supervivencia	$54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Rotor	
Área de barrido	7.3 m^2
Velocidad de rotación	100-500 rpm
Sistema de control de velocidad	"Furling" (doblaje de cola)
Sistema Eléctrico	
Salida	3 fases AC, Frecuencia Variable
Sistema controlador de voltaje	Regulado a DC, 12-120 V
Generador	Alternador Magnético Permanente

1.7.3 Sistema hibrido solar – eólico.

En la Figura 25 muestra la interconexión del sistema de generación fotovoltaica y el sistema eólico para conformar el sistema híbrido de estudio, esta interconexión se lleva a cabo a través de un elemento llamado bus de corriente directa, el cual está compuesto por dos barras de cobre, cada una con una polaridad: positiva (+) y negativa (-), en este mismo bus se interconecta el sistema de almacenamiento de energía o banco de baterías y el equipo inversor CD/CA que tiene la función de proporcionar el flujo eléctrico en corriente alterna a las cargas eléctricas que estén conectadas al sistema híbrido.

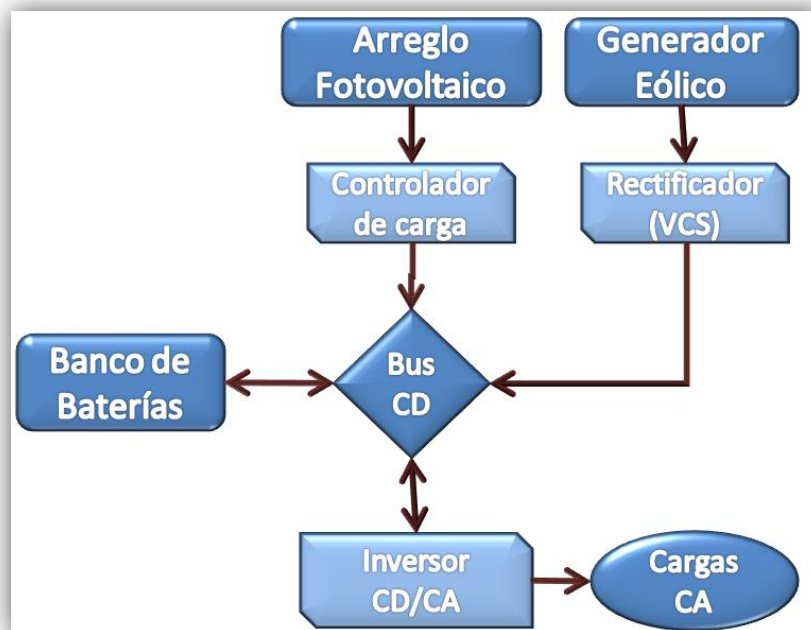


Figura 25. Esquema de interconexión del sistema híbrido fotovoltaico-eólico-baterías.

Otros dispositivos complementarios del sistema híbrido de estudio son:

1. Un banco de baterías de tecnología de plomo ácido de descarga profunda y con una capacidad nominal de 650 Ampere-hora.
2. Inversor de onda sinusoidal modificada 48 CD/ 120 CA.

Tabla 7 resume las principales características operativas del sistema híbrido. Se tiene que cada sistema de generación está configurado a un voltaje de 48 VCD, con una capacidad nominal total instalada es de 3.1Kw.

Tabla 7. Características operativas generales del sistema de generación híbrida eólica-solar.

Configuración General	
Capacidad nominal.	3.1 KW.
Voltaje de operación en CD.	48 VCD.
Autonomía del sistema de almacenamiento.	24 h.
Capacidad nominal de almacenamiento.	1590 Amp-h
Voltaje de operación en CA.	120 VCA.

Sistema de generación eólica	
Potencia eléctrica nominal	1500 W
Velocidad de inicio	$\approx 3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Velocidad nominal	$12.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Velocidad de salida	N/A
Velocidad de “furling”	$13.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Velocidad de Supervivencia	$54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Voltaje de rectificación.	48 VCD
Altura de instalación	32 m
Sistema de generación fotovoltaica	
Potencia	1.6 KW
Corriente	32 Amp
Voltaje	48 VCD
Total de módulos	16
Arreglos en paralelo	4
Sistema de almacenamiento	
Tipo	Plomo ácido
Voltaje	48 VCD
Capacidad	1590 Amp-h
Total de baterías	24
Arreglos en paralelo	3

1.8 Sistemas de medición y caracterización de los parámetros físicos.

1.8.1 Sistema de adquisición de datos.

El sistema de medición y control para realizar las mediciones es el CR10X, Figura 26. Este dispositivo admite casi cualquier sensor desde condiciones a nivel laboratorio hasta el ambiente industrial, además de ser programable según el tipo de tarea a realizar.

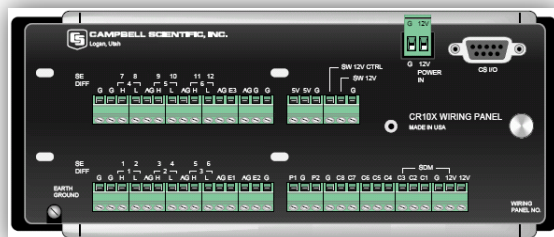


Figura 26. Adquiridor de datos CR10X.

En la Tabla 8 del apéndice 1, se puede apreciar las principales características operativas y de configuración del CR10X para el monitoreo de los diferentes tipos de señales eléctricas de los parámetros físicos evaluados en el sistema híbrido configurado.

1.8.2 Medición de los parámetros de la generación eléctrica.

Para realizar la caracterización de la generación eléctrica del sistema híbrido, es necesaria la medición de las variables de potencia de cada subsistema, en la Figura 27 se presenta un diagrama donde se muestra y clasifica los diferentes parámetros físicos.

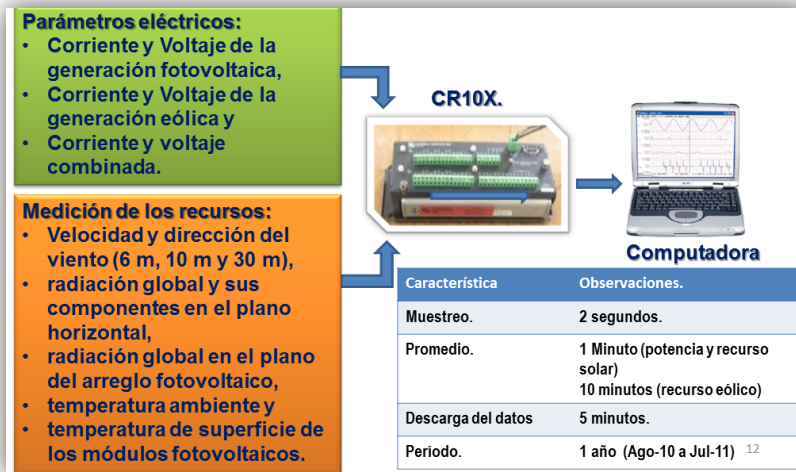


Figura 27. Diagrama representativo de las variables de interés para cada subsistema en el sistema híbrido de estudio.

Sensores de corriente y voltaje en CD y CA.

Los sensores empleados para la medición la corriente de los sistemas eólico y fotovoltaico (CD), y la salida del inversor a la demanda de las cargas eléctricas (CA) fue el sensor modelo CSLA2CD de la marca Honeywell, cuyas características se presentan en la Tabla 9 del apéndice A, y para el caso de la medición de voltaje se implementó un divisor de voltaje configurado según el tipo de señal a medir en cada caso. La configuración genérica de las conexiones de los sensores de voltaje-corriente VCD y VCA es como muestra la Figura 28.

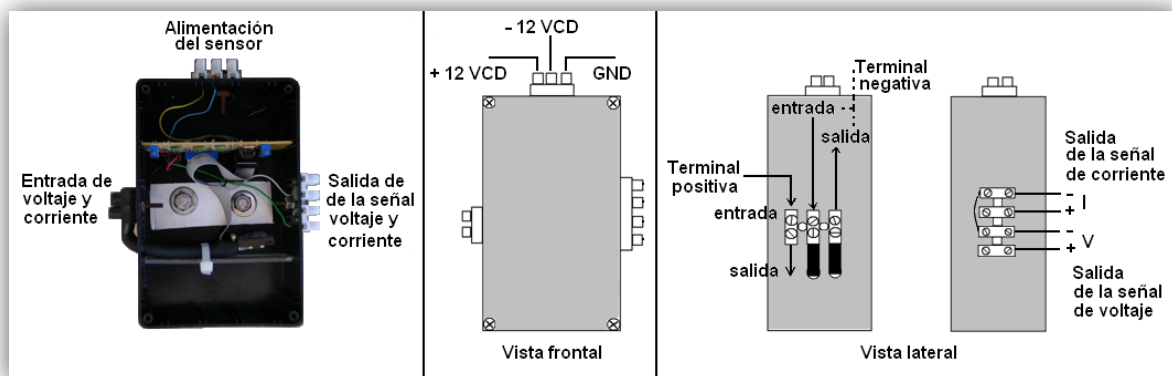


Figura 28. Diagrama y configuración de los sensores de voltaje-corriente VCD y VCA.

A los sensores de medición se les implementó tarjetas acondicionadoras de las señales a los rangos permitidos por el sistema de adquisición de datos. Para el sensor de corriente y voltaje utilizados en CD y CA se le implementó un transductor cuyas características están enlistadas en la Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 del apéndice A. Para en caso de las mediciones del voltaje en CA, se empleó adicionalmente un transformador de VCA-VCD conectado a un transductor que reduce el valor del voltaje del transformador.

1.8.3 Medición de los recursos solar y eólico.

Para la medición y caracterización del recurso solar-eólico, y las distintas variables meteorológicas de interés en el sitio de instalación del sistema híbrido, se emplearon los sensores y sistemas que se describen a continuación.

Sensores de medición del recurso solar.

Para la medición del recurso solar se emplearon sensores instalados en una estación solarimétrica, (Figura 29). Esta estación posee un sistema de seguimiento por medio de software y es capaz de medir las componentes de la radiación: radiación global en el plano horizontal, la radiación difusa y la radiación directa. Para la medición de las dos primeras se emplearon piranómetros y en la medición de la radiación difusa se empleó un dispositivo de sombreado en uno de los piranómetros. En el caso de la medición de la radiación directa se empleó un pirheliómetro.

Las características técnicas operativas de la estación solarimétrica y los sensores instalados en ella se presentan la tabla 13 del Anexo B.



Figura 29. Vista general de la estación solarimétrica (izquierda) y vista de los sensores empleados para medición de los componentes de la radiación solar.

Sensores de medición del recurso eólico.

Para la medición del recurso eólico se emplearon dos estaciones meteorológicas instaladas en la torre del aerogenerador de estudio. Una vista aérea de la torre de medición se muestra en la Figura 30 permitiendo identificar las posiciones relativas de la torre y los obstáculos circundantes. Los obstáculos circundantes, especialmente a la altura de 10 metros, son de gran importancia por su influencia en los patrones de viento en el sitio, en particular en la variabilidad en la velocidad y la cizalladura del viento.

Los sensores instalados en la torre de medición incluyen dos juegos de anemómetros y flechas, con un sensor de temperatura ambiente. Las características operativas de los sensores se muestran en la tabla 14 del Anexo B.

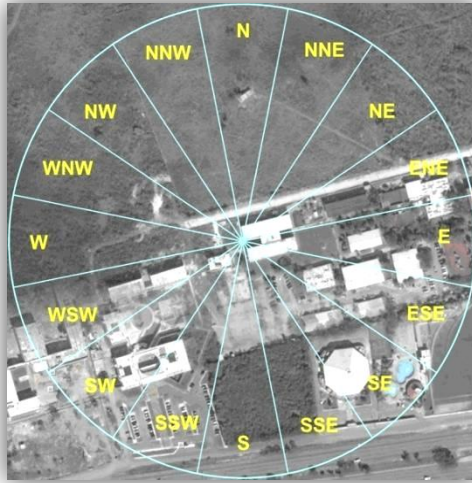


Figura 30. Vista de 400m x 400m del área circundante en el sitio de medición, se muestran los sectores direccionales con el centro en la torre de medición.

Los anemómetros se instalaron a 10 y 30 m por encima del nivel del suelo, mientras que el sensor de temperatura ambiente estuvo a 10 m por encima del nivel del suelo. Los sensores del viento fueron calibrados por el fabricante. En la Figura 31 se aprecia la estación ubicada a 30 m de altura.



Figura 31. Vista de la estación anemométrica instalada a 30 metros de altura para la evaluación del recurso eólico.

Sensores de temperatura ambiente y de superficie de los módulos fotovoltaicos.

Para la medición de la temperatura superficial de los módulos fotovoltaicos instalados en el arreglo, se emplearon un total de 8 sensores de superficie en la parte trasera de cada módulo con los siguientes identificadores, (Figura 32): PVS11, PVS21, PVS31, PVS41, PVS14, PVS24, PVS34 y PVS44.

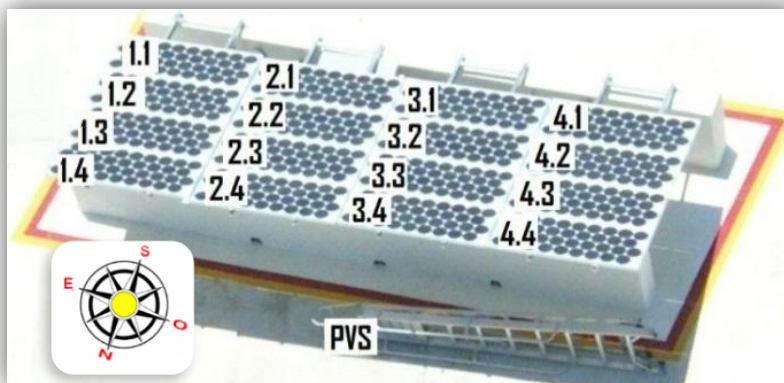


Figura 32. Vista del arreglo fotovoltaico con los identificadores individuales para cada módulo.

En la Figura 33 muestra la parte posterior de los módulos fotovoltaicos con los sensores instalados.



Figura 33. Ubicación de los sensores de temperatura de superficie instalados en los módulos fotovoltaicos.

Para las mediciones de la temperatura ambiente y la velocidad y dirección del viento en la zona de instalación del arreglo fotovoltaico, se instaló una pequeña estación meteorológica como muestra la Figura 34.

Figura 34 Estos sensores se instalaron en una torre con una altura de 3 metros a fin de evitar posibles influencias de la superficie del techo.



Figura 34. Mini-torre instalada para el arreglo fotovoltaico con los sensores de temperatura ambiente, de velocidad y dirección de viento.

1.9 Metodología.

El régimen de monitoreo y almacenamiento de datos se realizó como sigue:

- I. La razón de monitoreo fue de un dato cada dos segundos.
- II. Se determinó el promedio de cada minuto, este valor se almacenó como dato en la memoria del adquiridor y después de cada 5 minutos, estos datos fueron enviados a una computadora.
- III. Se generó una base de datos diaria para cada variable medida.

IV. El período de medición comprendió de junio de 2010 a mayo de 2011.

V. El sistema híbrido estuvo conectado un patrón de carga constante de 495 W, durante todo el período de evaluación.

VI. El almacenamiento de la energía se realizó mediante un banco de baterías de plomo ácido con una capacidad de 1590 Amp-h y una autonomía de 24 horas.

1.9.1 Análisis de los patrones eléctricos del sistema híbrido.

La evaluación de la generación de energía eléctrica en el sistema híbrido se llevó a cabo mediante el análisis de las contribuciones de energía provenientes del arreglo fotovoltaico y del aerogenerador.

1.9.2 Análisis del comportamiento del recurso solar y la generación fotovoltaica

Para analizar el comportamiento de la generación eléctrica fotovoltaica se estudió primeramente la radiación solar disponible y la distribución de los vientos para luego identificar los patrones térmicos registrados en la superficie del arreglo fotovoltaico y cuantificar la energía eléctrica que estos producen.

Determinación de la radiación solar disponible mediante:

1. El análisis del comportamiento de los patrones diurnos de las componentes de la radiación solar anual para las mediciones realizadas en el plano horizontal.
2. El análisis del comportamiento de los patrones diurnos de las componentes de la radiación solar mensual en el plano horizontal.
3. La comparación de los patrones medidos de la radiación solar en el plano del arreglo fotovoltaico con la radiación medida en el plano horizontal.

Análisis de la distribución de los vientos mediante:

1. La determinación de los patrones de velocidad y dirección de viento diarios, medidos cerca de la instalación del arreglo fotovoltaico.
2. El análisis de la distribución de frecuencias de los vientos por direcciones sobre el arreglo fotovoltaico.

Identificación de los patrones térmicos registrados en la superficie del arreglo fotovoltaico a través de:

1. El análisis del comportamiento diario para el período anual de las temperaturas en la superficie de los módulos fotovoltaicos.
2. La determinación de las variaciones máximas de la temperatura en la superficie de los módulos.
3. Evaluación del efecto que tiene la velocidad y dirección del viento sobre la distribución de las temperaturas en la superficie de los módulos presentes en el sitio.

Evaluación de los patrones de producción de energía eléctrica por el arreglo fotovoltaico a través de:

La evaluación de los efectos en la salida de potencia eléctrica debido al comportamiento diario, mensual y anual del recurso solar y las temperaturas alcanzadas por los módulos.

1.9.3 Análisis del comportamiento del recurso y generación Eólica.

En el caso del análisis del comportamiento del generador eólico se determinó primero el perfil del viento y la cizalladura para luego determinar el perfil vertical térmico y finalmente analizar la energía eléctrica del aerogenerador.

La determinación del perfil vertical del viento en el entorno del generador eólico se realizó a través de:

1. La comparación de los patrones diarios de la velocidad y dirección del viento a las alturas de medición, 10y 30 m.
2. El análisis de la distribución de velocidades por direcciones a 10 y 30 m de altura.
3. La determinación del comportamiento de los patrones de la velocidad anual en el sitio.

Análisis del comportamiento de la cizalladura y el perfil vertical térmico del viento.

1. Cálculo del comportamiento diario y estacional de la cizalladura.
2. Determinar el comportamiento diario y estacional de la estabilidad atmosférica.

Evaluación de los patrones de producción de energía eléctrica por el aerogenerador a través de:

La evaluación de los efectos en la salida de potencia eléctrica debido al comportamiento diario, mensual y anual del recurso eólico y la estabilidad atmosférica.

Determinación de los patrones de generación eléctrica del sistema híbrido.

Análisis del efecto combinado de la disponibilidad de los recursos solar y eólico en la producción de energía eléctrica por períodos diario y anual.

CAPITULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.1 Generación de energía en el arreglo fotovoltaico

Para el análisis de la generación de energía eléctrica en el arreglo fotovoltaico, se presentan primeramente los resultados del comportamiento del recurso solar disponible en el sitio de la instalación, los efectos térmicos sobre los módulos fotovoltaicos y finalmente la salida de potencia de la energía generada.

1.1.1 Radiación solar disponible

1.1.1.1 Patrón diario promedio anual

Como el comportamiento del recurso solar está asociado a la posición geográfica del sitio de evaluación, es importante determinar el patrón promedio anual de un día típico de la radiación global y sus componentes difusa y directa. En la Figura 35 se puede apreciar que el día típico inicia a las 6:00 horas y finaliza poco después de las 19:00 horas, donde el promedio máximo para la componente global de la radiación se presenta a las 12:00 horas del día con un valor de $750 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, para el caso de la componente directa, ésta se presenta a las 11:30 horas con un valor de $550 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y finalmente para la componente difusa, el máximo se presenta a las 12:00 horas con un valor de $250 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

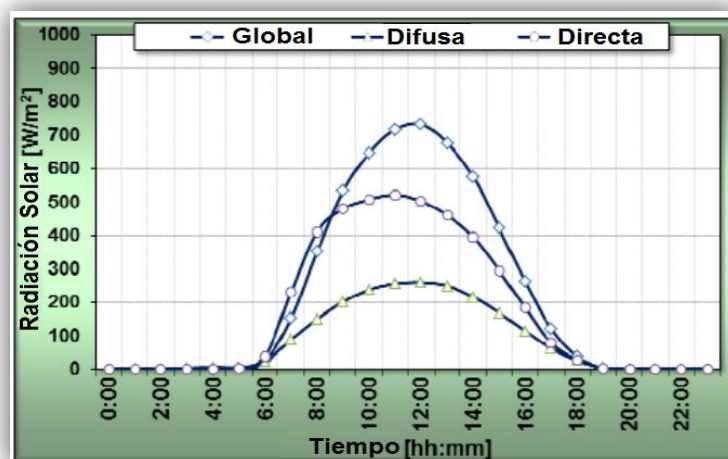


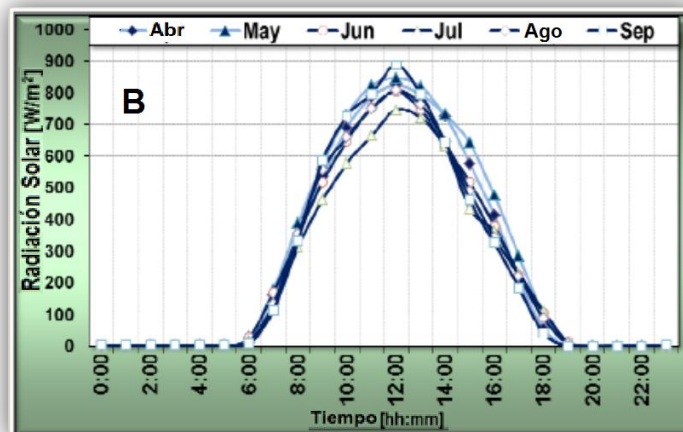
Figura 35. Comportamiento diario de las componentes de la radiación solar.

Es importante hacer notar que el comportamiento de la radiación directa presenta valores promedios mayores que los de la radiación difusa a lo largo del día, siendo la componente con mayor contribución a la radiación solar global (por encima del 50 %). Estos comportamientos son similares a los resultados obtenidos por Acevedo [12] en su caracterización preliminar de la radiación solar en la región de estudio; otro trabajo que muestra similitud en sus resultados es el realizado por Villagrana [35] con la evaluación del recurso solar en el estado de Zacatecas, los picos se presentan en ambos casos alrededor del medio día y comportamientos similares entre las componentes de la radiación solar.

1.1.1.2 Patrones diarios promedios mensuales

Debido a que la radiación directa es la que presenta la mayor contribución a la radiación global, esta última es la que se tomó en cuenta para explicar el comportamiento del recurso y su efecto en la generación de energía eléctrica fotovoltaica, y para mayor claridad en la discusión de los resultados, son las que se presentarán en los análisis subsecuentes.

En las Figuras 36 y 37 se presentan los comportamientos de las componentes global y directa de la radiación solar medidas en el plano horizontal para determinar los patrones diarios mensuales.



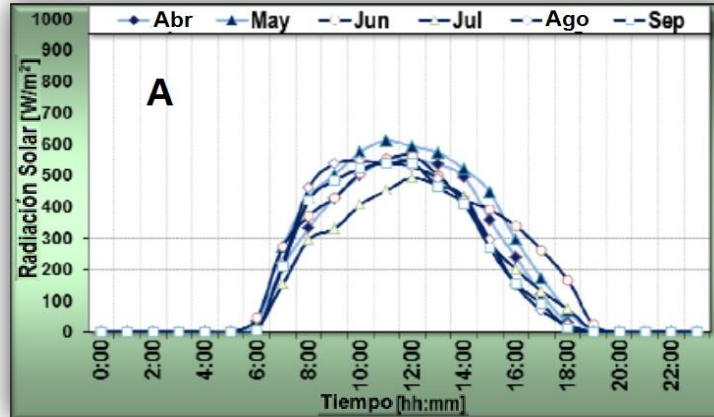


Figura 36. Patrones diarios de la radiación Solar mensual de abril a septiembre: (a) Radiación Solar directa (b) Radiación Solar Global.

El comportamiento de los patrones diarios mensuales indicó que el día típico con menor radiación solar global se presentó en los meses de enero y diciembre con valores promedios mínimos por debajo de los $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, ver Figura 37; mientras que el día típico con mayor radiación se presentó en los meses de abril y septiembre con valores promedios cercanos a los $900 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, ver Figura 36. Este resultado confirmó que la estación invernal presenta una menor radiación solar global con respecto a la radiación incidente en el verano. Estos resultados muestran un comportamiento similar al reportado por Villagrana et al [35] quienes encontraron que para un año completo de evaluación para la ciudad de Zacatecas, México, los valores promedio máximos se presentaron entre los meses de marzo, abril y mayo, mientras que el período de menor radiación coincide con los meses de octubre a diciembre, confirmando que en el hemisferio norte tenemos por lo general los mayores valores de radiación en verano y que en invierno la radiación decae a los valores más bajos.

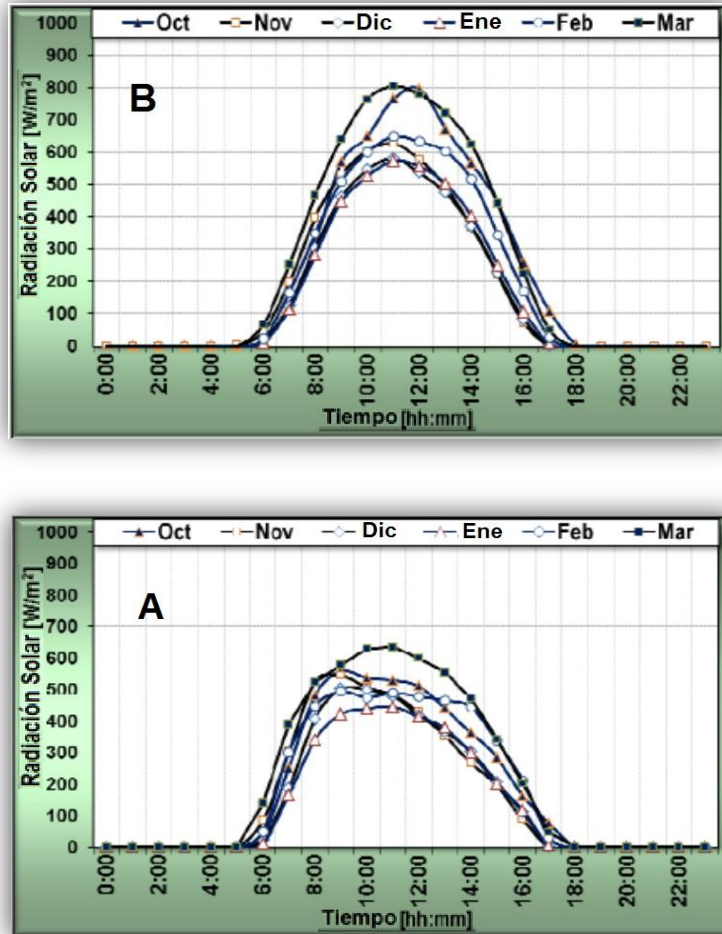


Figura 37. Patrones diarios de la radiación Solar mensual de octubre a marzo: (a) Radiación Solar directa (b) Radiación Solar Global.

Para el caso de la componente directa, se tienen valores máximos diarios entre los meses de verano comprendidos entre abril y septiembre con valores promedio de $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, ver Figura 36, exceptuando el mes de julio que presentó una caída a $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ coincidiendo con el período de lluvias en la región (presencia de nubosidades). Se observó que entre los meses de diciembre a febrero se presentaron los valores mínimos con promedios de alrededor de $450 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (coincidiendo con el período de invierno), ver Figura 37. Este comportamiento es similar al reportado por Villagrana [35] y Zawilska [36] donde para dos sitios diferentes la componente directa presenta un comportamiento similar al de este estudio y que además, durante el período de lluvias y temporales esta componente decae debido a presencia de nubosidades.

1.1.1.3 Radiación solar en el plano del arreglo fotovoltaico

Además de las mediciones de radiación solar global en el plano horizontal, se realizaron mediciones de esta variable en el plano de inclinación de los módulos fotovoltaicos instalados (21° con respecto a la horizontal). Este análisis se efectuó con el propósito de identificar si había alguna diferencia entre la radiación incidente en el plano de los módulos y la recibida en la estación solarimétrica (plano horizontal). El comportamiento de ambas mediciones se presenta en la Figura 38.

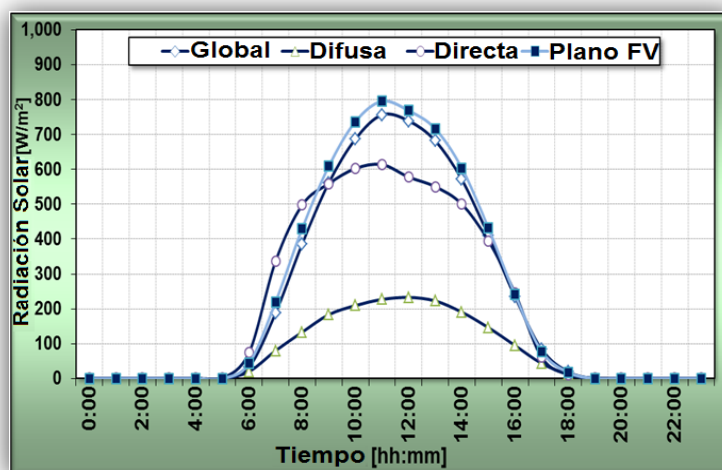


Figura 38. Comportamiento de la radiación solar en los planos horizontal y del arreglo fotovoltaico durante el periodo de estudio. (Global).

Se observó que para ambos casos se presenta el mismo patrón a lo largo de todo el año. La máxima diferencia entre ambas mediciones fue de 8% (siendo mayor la medida en el plano del arreglo fotovoltaico) y se observó aproximadamente a las 11 horas. Por lo general, en la literatura, los valores de radiación global se reportan medidos en el plano horizontal [35, 36].

1.1.2 Distribuciones de los vientos en el arreglo fotovoltaico

1.1.2.1 Patrones diarios de velocidad del viento

Los comportamientos de la velocidad del viento se pueden apreciar en las Figura 39 y

Figura 40. Por otro lado, los patrones se dividieron en dos grupos: de octubre a marzo y de abril a septiembre, teniendo en cuenta sus similitudes en comportamiento durante estos dos períodos con el fin de simplificar su análisis.

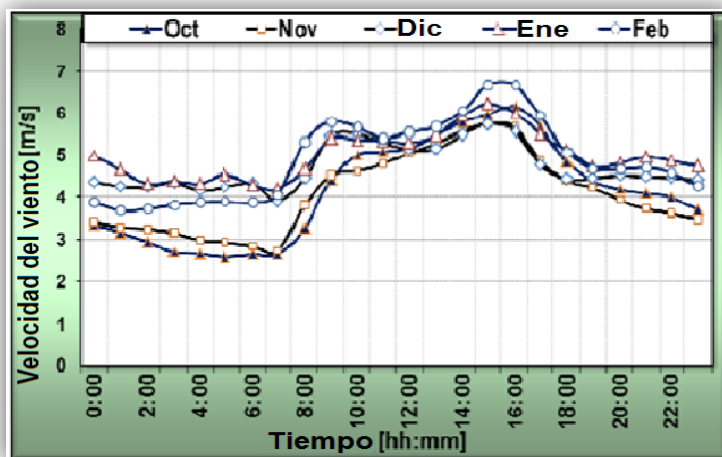


Figura 39. Ciclos diarios del comportamiento de la velocidad del viento correspondientes al período del mes de octubre a aumentar marzo.

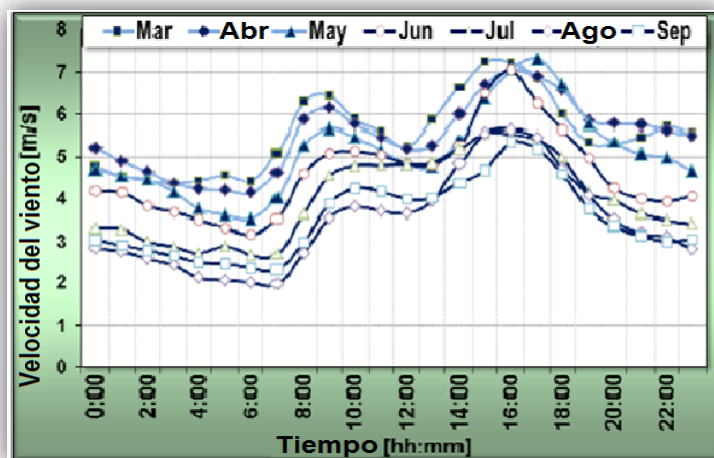


Figura 40. Ciclos diarios del comportamiento de la velocidad del viento correspondientes al periodo del mes de abril a septiembre.

En las gráficas se aprecia que el comportamiento de la velocidad del viento presenta un

patrón de doble pico durante el día y a lo largo del año. El primer pico se registra entre las 8:00 y 9:00 horas, y se debe a la diferencia de temperaturas existente entre la tierra y el mar, siendo la temperatura de este último la mayor, por lo que el viento se mueve desde la tierra hacia el mar. El segundo pico se presenta alrededor de las 15:00 horas, este comportamiento de la velocidad del viento en la tarde se debe al efecto de la brisa marina y también es producto de diferencias de temperatura entre la tierra y el mar. En este caso, la temperatura de la tierra es superior a la del mar, generando vientos del mar hacia la tierra. La inversión térmica entre el mar y tierra generan una caída en las velocidades del viento como lo demuestra el valle que aparece entre los dos picos de las Figuras 44 y 45. El fenómeno que está sucediendo es que el viento está cambiando de dirección, como se podrá demostrar más adelante.

Este patrón diario es consistente con los resultados de otras regiones costeras, por ejemplo, con el trabajo de Farrugia [37] el caso de Malta y los de Rehmana [38] en la región del Golfo de Arabia Saudita.

El comportamiento mostrado en la Figura 39, indica que en el período comprendido entre los meses de octubre a marzo (otoño e invierno), este doble pico es menos pronunciado si se compara con el que se presenta en el período comprendido entre los meses de abril a septiembre (primavera y verano), véase la Figura 40. También se puede observar que para el período otoño–invierno se llegan a tener las velocidades más altas en el segundo pico diario durante el año, registrándose valores promedios mayores a los $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, esto nos indica que el viento proveniente de la brisa marina es la que trae los vientos con mayor velocidad en el sitio de medición.

1.1.2.2 Patrones diarios de dirección del viento.

En lo que respecta al comportamiento de la dirección del viento los resultados indicaron que las mayores variaciones se presentan durante la primavera y el verano, ver Figura 41, en comparación con el otoño y el invierno, ver Figura 42. Estas variaciones en el comportamiento son producidas por la influencia de la brisa marina en tierra. En el caso del presente trabajo, el efecto es marcado ya que el sitio de estudio se encuentra a 25 kilómetros de las costas y a sólo 7 metros por encima del nivel medio del mar, además de las condiciones casi planas de la mayoría de la superficie en la península de Yucatán.

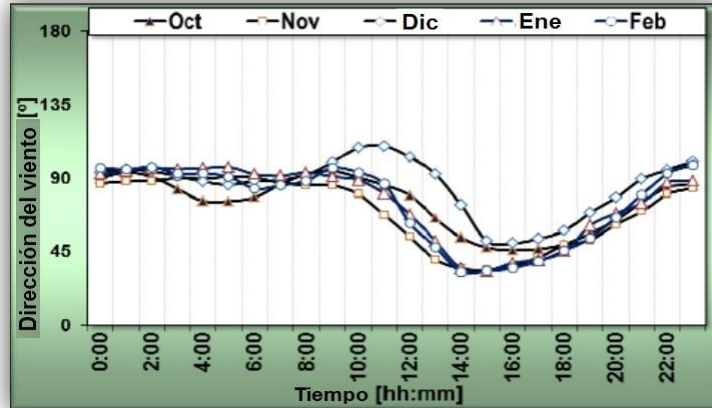


Figura 41. Ciclos diarios del comportamiento de la dirección del viento correspondientes al período del mes de octubre a marzo.

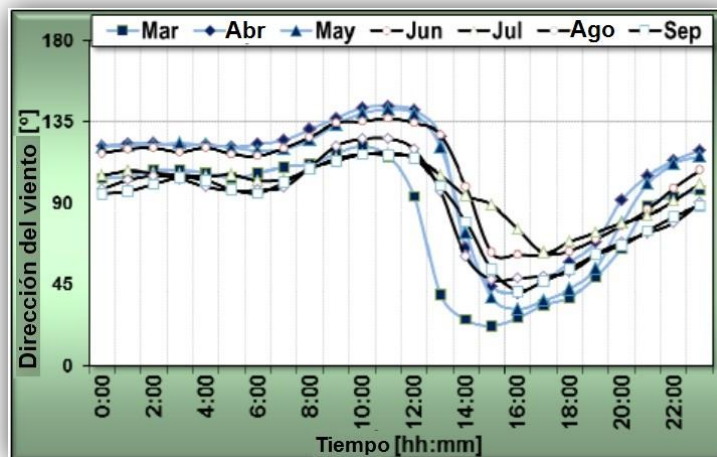


Figura 42. Ciclos diurnos del comportamiento de la dirección del viento correspondientes al periodo del mes de marzo a septiembre.

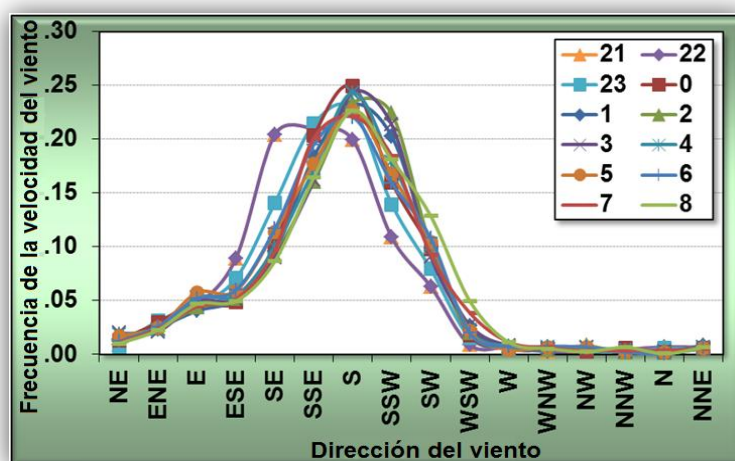
Por las mañanas se observó que la dirección preferencial del viento es de tierra hacia el mar y entre la tarde y la noche se pudo apreciar un cambio en las corrientes del viento en dirección de mar hacia tierra (brisa marina) coincidiendo, este cambio, con las máximas velocidades del viento reportadas en el apartado anterior.

1.1.2.3 Distribución de frecuencias de los vientos por direcciones y por hora

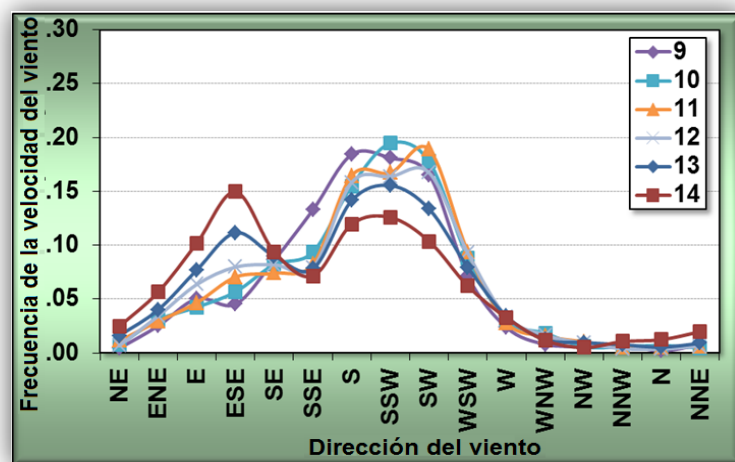
Para poder analizar el comportamiento de los perfiles térmicos en el arreglo fotovoltaico,

fue necesario realizar un análisis más profundo del comportamiento de la dirección del viento en el sitio de estudio. Las frecuencias de incidencias de las direcciones de los vientos se clasificaron en forma horaria:

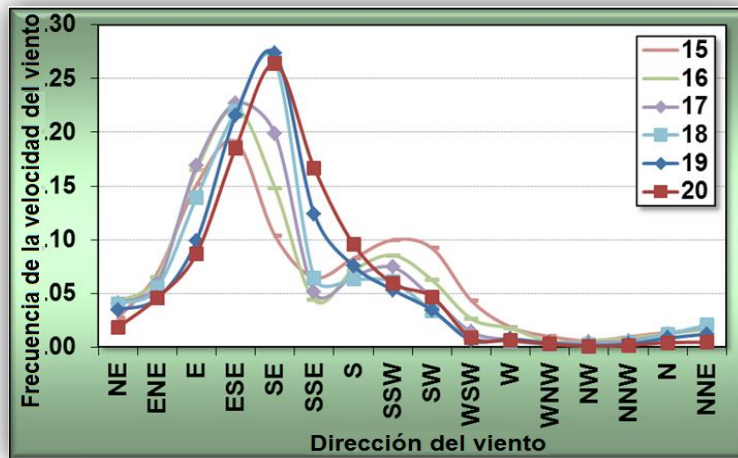
1. 21:00-08:00 horas, condiciones predominantemente nocturnas, con disminución de la temperatura ambiente, Figura 43a.
2. 09:00-14:00 horas, condiciones predominantemente diurnas, con un aumento de la temperatura ambiente, Figura 43b, y finalmente,
3. 15:00-20:00 horas, condiciones predominantemente diurnas, con disminución de la temperatura ambiente, Figura 43c.



(a)



(b)



(c)

Figura 43. Distribución de las frecuencias de la dirección del viento durante: a) la noche, cuando se presenta la disminución de la temperatura ambiente, b) el día, cuando se presenta el aumento de la temperatura ambiente y c) la tarde, cuando se presenta la disminución de la temperatura ambiente.

Se puede observar que durante todo el día, menos del 8% de todos los vientos clasificados provienen del sector oeste hacia el noreste. Durante el período de la noche, el viento sopla tierra adentro predominantemente entre los sectores sureste y suroeste. Posteriormente al amanecer, la contribución de estos sectores disminuye y desde las 11:00 horas se presenta una clara contribución alrededor del sector este-sureste hasta las 14:00 horas. Posteriormente, la brisa marina comienza a hacerse cargo de la distribución de frecuencias del viento hasta alrededor de las 20:00 horas de la noche.

1.1.3 Patrones térmicos registrados en la superficie del arreglo fotovoltaico.

Para complementar el análisis del arreglo fotovoltaico, se presenta el comportamiento de las temperaturas de la superficie de los ocho módulos fotovoltaicos cuya distribución dentro del arreglo resulta relevante para los procesos de transferencia de calor, ver distribución de los sensores de temperatura en la Figura 33.

Los patrones de temperatura diarios se presentan en la Figura 44. La temperatura ambiente se muestra en la misma gráfica como referencia. En este caso, alrededor de la 11:00 de la mañana, los módulos PVS11 y PVS14 situados en el lado este de la matriz, presentan menor temperatura debido a la presencia de los vientos dominantes que vienen

de esa dirección, (Figura 43b). Por otro lado después de las 2:00 pm, los módulos PVS14, PVS24, PV34 y PVS44 situados en el lado norte de la matriz del arreglo, reciben corrientes de viento con velocidades más altas provenientes de la dirección norte, ver Figura 43c. Esto produce una caída de temperaturas hasta los niveles más bajos en el período nocturno. Otro aspecto que es interesante hacer notar es el hecho de que el comportamiento de las temperaturas de todos los módulos tiende a seguir el mismo de la radiación solar incidente.

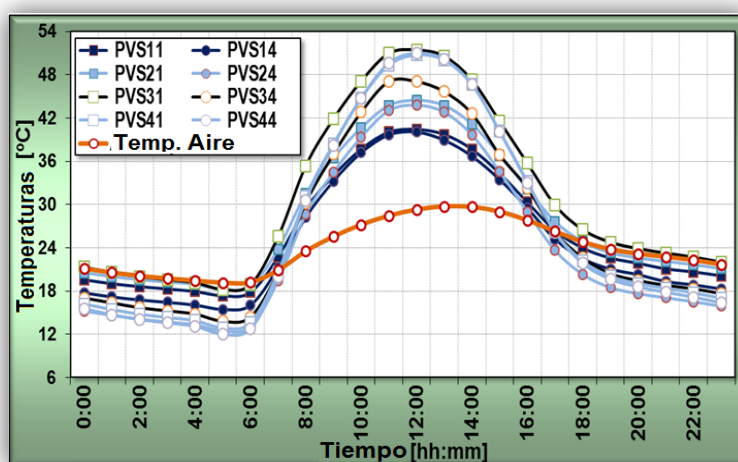


Figura 44. Valores promedio de las mediciones en el patrón diario de las temperaturas en la superficie de los módulos fotovoltaicos para todo el período de estudio.

En la Figura 44, también se puede observar la variación de las temperaturas de las superficies en el arreglo fotovoltaico. El valor más alto de temperatura se registró alrededor del mediodía para el módulo fotovoltaico PVS31, con un valor por encima de los 50 ° C; y el mínimo se observó aproximadamente a las 5 de la mañana con un valor promedio de 12°C para el módulo PVS44.

Finalmente, en la Figura 45 se muestra que las temperaturas en la superficie de los módulos fotovoltaicos pueden presentar variaciones de hasta 12 °C alrededor del mediodía, que es cerca del doble de la diferencia de temperaturas medida durante el período nocturno. Esto puede indicar que los efectos de transferencia de calor por radiación son más importantes en el día y la transferencia de calor por convección predominante por la noche.

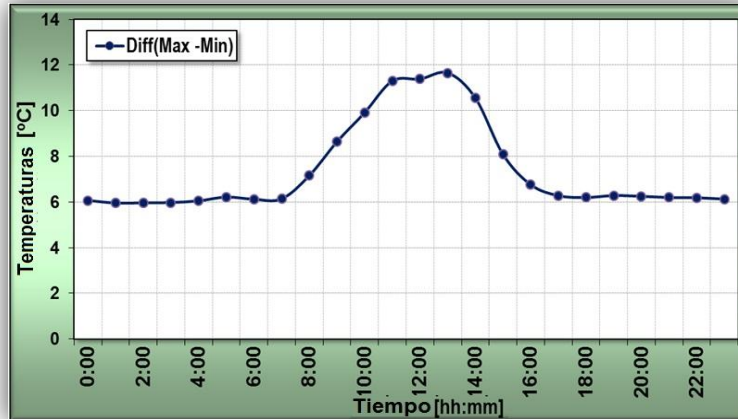


Figura 45. Rango de la variación de las temperaturas en los patrones diurnos medidos en los sensores instalados para todo el periodo de estudio.

1.1.4 Energía eléctrica producida por el arreglo fotovoltaico.

Parte esencial del análisis del comportamiento del sistema fotovoltaico instalado, es la salida de potencia del mismo cuando es sometido a las condiciones de radiación y temperatura en el sitio de estudio. Los patrones de corriente eléctrica generados por el arreglo fotovoltaico se muestran en la Figura 46.

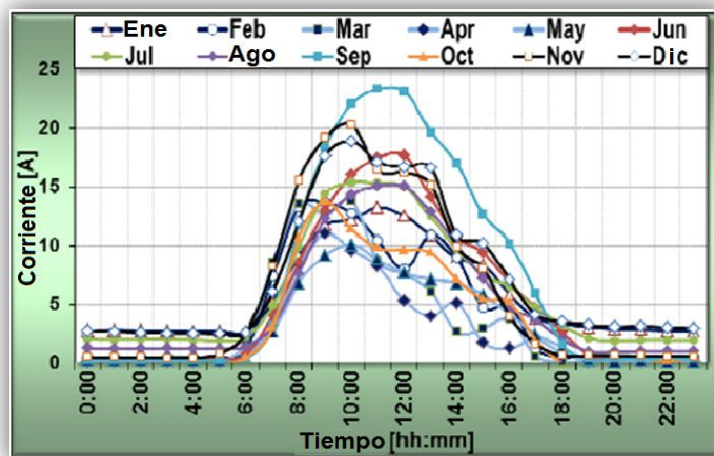


Figura 46. Promedios horarios para cada mes de la corriente eléctrica producida por el arreglo fotovoltaico.

La generación de corriente eléctrica tiende a replicar los patrones de radiación

presentados para cada mes durante el período de medición (Figura 36 y Figura 37). Estos resultados indican que la cantidad de radiación solar incidente es proporcional a la corriente eléctrica generada. El sistema fotovoltaico instalado presentó corrientes máximas cercanas a los 25 Amp para los meses de mayor insolación y corrientes cercanas a los 10 Amp para los meses de menos radiación solar.

Por otro lado, la integración de la corriente y voltaje generado del arreglo fotovoltaico, Figura 47, permite determinar que el pico promedio diario de la corriente generada se presenta alrededor de las 10:00 de la mañana mientras que el pico de la radiación solar se presenta al mediodía.

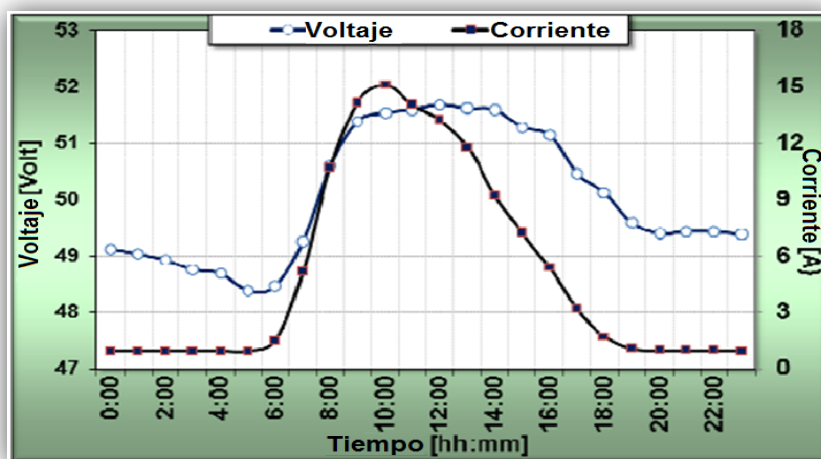


Figura 47. Promedio horarios de todo el período de la corriente y voltaje eléctrico producido por el arreglo fotovoltaico.

Este comportamiento en el desfase entre el pico de la generación eléctrica del arreglo fotovoltaico y el pico del recurso solar, se explica por el hecho de que la carga eléctrica a la cual está sometido el sistema híbrido no es muy alta y también a que cuando amanece inicia el proceso de carga del sistema de almacenamiento (en el periodo nocturno el banco de baterías del sistema híbrido es el que suministra energía eléctrica), por lo que por la mañana, se están presentando dos cargas. Posteriormente, cuando las baterías ya no requieren más corriente eléctrica, las cargas netas se reducen y el pico decae. Por otro lado, esta fase de decaimiento de la corriente se ve influenciada por la generación eólica.

El hecho de que el comportamiento de la generación eléctrica sea similar al de la radiación y de que suministró toda la energía demandada por las cargas sin presentar

problema alguno, indica que los perfiles de temperatura de operación alcanzados en los módulos fotovoltaicos, no tuvieron influencia en la generación fotovoltaica.

1.2 Comportamiento de la generación eólica.

Para el caso del análisis del generador eólico, se presentan los resultados del comportamiento del perfil vertical del recurso eólico, análisis de la cizalladura, perfil térmico del viento, la estabilidad atmosférica y finalmente la salida de potencia de la energía generada.

1.2.1 Perfil vertical del viento en el entorno del generador eólico

1.2.1.1 Patrones diarios

Se pudieron identificar cuatro fases en el comportamiento de la velocidad del viento durante el ciclo diario (Figura 48). La fase I corresponde a un período de reducción de la velocidad del viento durante la noche, la fase II a un aumento brusco de la velocidad del viento en las primeras horas de la mañana seguido de la fase III que es un período cuando las velocidades del viento tienden a ser relativamente constantes durante la tarde y posteriormente la presencia de un pico en la velocidad del viento durante la tarde/noche (Fase IV). En esta última fase, existe un cambio en la dirección del viento, es el que corresponde a la brisa marina.

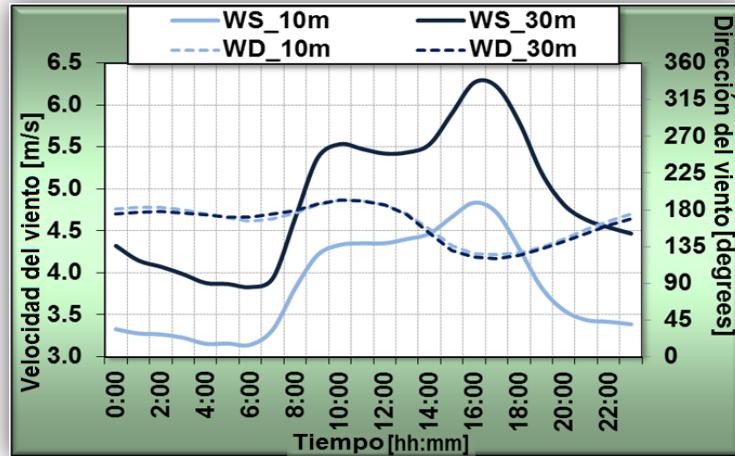


Figura 48. Comportamiento de la velocidad y dirección del viento en el ciclo diario.

Estos resultados también mostraron que las velocidades del viento a una altura de 10 m siempre fueron menores a las velocidades registradas a 30 m, lo cual comprueba la existencia de cizalladura en el patrón de velocidades del recurso.

En términos generales, el comportamiento mostrado por el patrón diario obtenido en el sitio de estudio es consistente con los resultados otros estudios realizados en otras regiones costeras, tal como se describió en el análisis de las mediciones del viento cercano a la instalación del arreglo fotovoltaico.

1.2.1.2 Distribución de velocidades por direcciones

Para identificar la dirección de las velocidades más altas del viento para las dos alturas de medición, se graficaron los promedios de la velocidad para cada dirección tal como se muestra en la Figura 49. El gráfico muestra que las velocidades del viento más altas se encuentran entre los sectores de dirección noreste y sur.

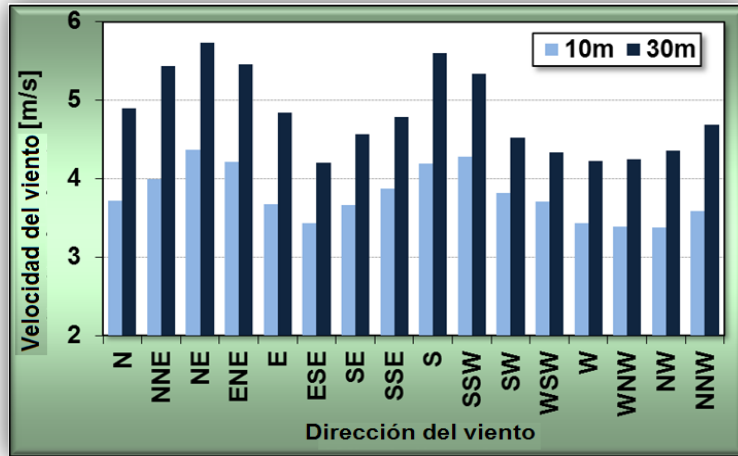


Figura 49. Promedios de las velocidades de viento para cada sector de dirección.

1.2.1.3 Patrón de velocidades anual

El patrón estacional de la velocidad del viento se puede apreciar en la Figura 50 donde se muestra que la velocidad máxima del viento se registró en el mes de marzo ($5.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 30 m de altura y $4.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 10m) y el valor mínimo en septiembre con velocidades de 3.8 y $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a 30 y 10 m respectivamente.

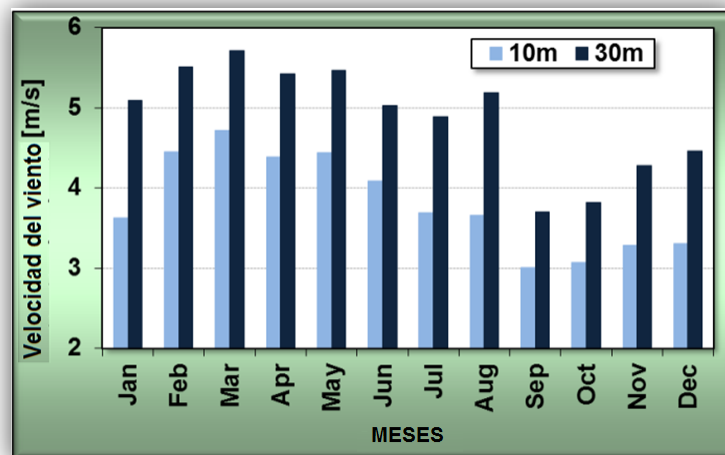


Figura 50. Promedios de la velocidad del viento sobre la estabilidad ciclo-atmosférica anual.

1.2.2 Estabilidad atmosférica

Para completar el análisis de los patrones del viento, se presentan primero los resultados del comportamiento de la estabilidad atmosférica, que nos permitirá entender el patrón de la cizalladura en las velocidades de viento. En la Figura 51, se puede observar los porcentajes en el nivel de estabilidad horaria en el ciclo diario, indicando que la atmósfera se comporta de forma más inestable al mediodía, donde el 90% de los datos medidos indican este grado de inestabilidad, (que es cuando se presentan las temperaturas ambientes más altas). A partir de este momento, la inestabilidad va decreciendo hasta llegar a un mínimo (70%) alrededor de la medianoche. Para cerrar el ciclo, la inestabilidad empieza a aumentar conforme va amaneciendo. Se pudo observar que en promedio, la inestabilidad de la atmósfera predomina durante gran parte del día. Comportamientos similares fueron observados en trabajos realizados por Farrugia [37] y Rehmana [38, 39].

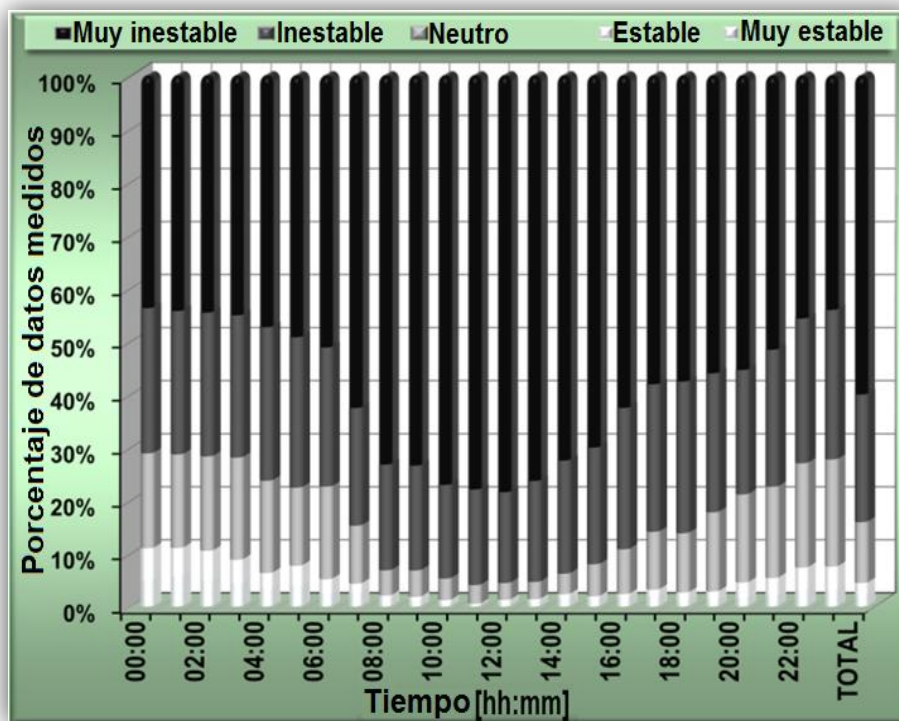


Figura 51. Distribución diurna de las clases de estabilidad atmosférica.

1.2.3 Cizalladura y perfil vertical térmico del viento

El comportamiento diario anual de la cizalladura del viento y de la temperatura ambiente

se muestra en la Figura 52. Los comportamientos diarios estacionales de la cizalladura y de la temperatura ambiente se muestran en las Figuras 53a y 53b, respectivamente.

Tomando en cuenta estos resultados, junto con los mostrados anteriormente del comportamiento de la velocidad y dirección del viento, se tiene que durante la noche (entre las 21:00-08:00 horas) el viento proviene principalmente de la dirección SSE-S con valores promedio bajos de cizalladura en el viento (0.14), mientras que en la mañana (entre las 9:00 - 14:00 horas), la dirección principal del viento es SSW-WSW dando lugar a un aumento en el valor promedio de la cizalladura (0.2) y, finalmente, por la tarde (entre las 15:00-20:00 horas) el viento del NE-SE domina con valores promedios más altos de cizalladura (0.27).

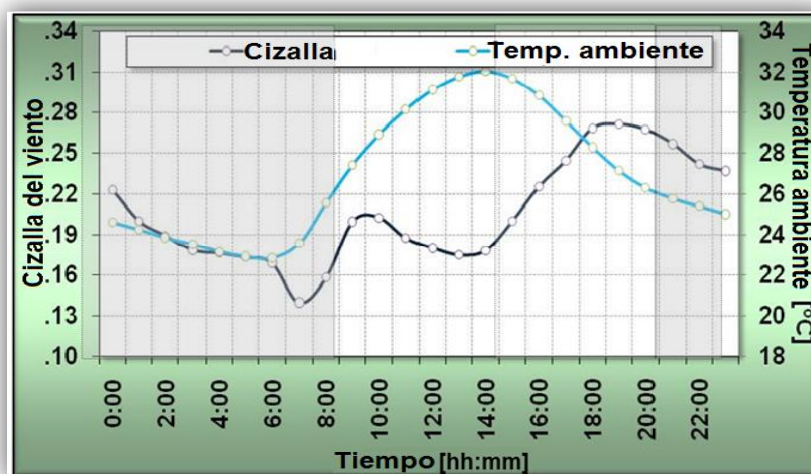
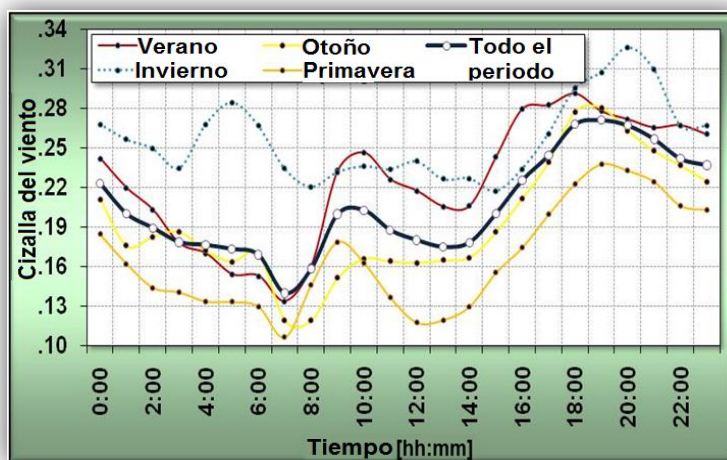


Figura 52. Patrón diario de los valores promedios de la cizalladura del viento y la temperatura ambiente en el periodo de estudio.

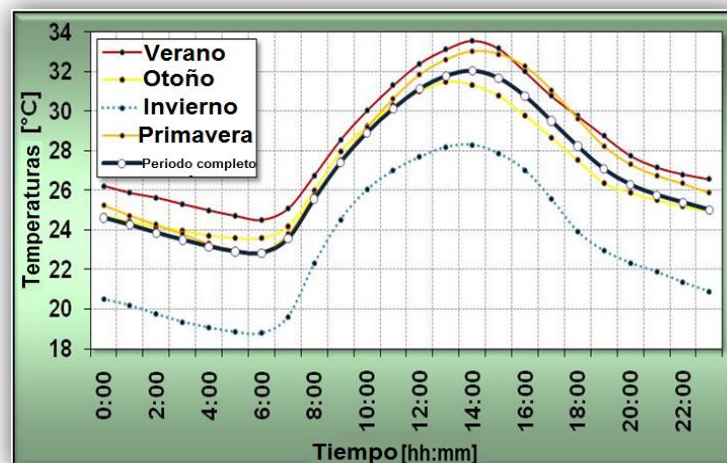
Como se puede observar en la Figura 52, a las 6 horas la cizalladura presenta un mínimo (0.14) debido a un fenómeno local de brisa tierra-mar para luego aumentar hasta alcanzar un valor de 0.2 a las 10 horas debido a que es cuando se registran la mayor diferencia entre las velocidades del viento a 10 y 30 m (para el mismo fenómeno: corriente tierra-mar). Luego, la cizalladura empieza a disminuir debido a que el aumento de la temperatura ambiente propicia un aumento de la inestabilidad atmosférica, coincidiendo con el proceso de inversión de la dirección del viento de tierra-mar a mar-tierra. A partir de las 14 horas, la cizalladura aumenta de nuevo debido a que la temperatura ambiente disminuye y entra la brisa marina presentando las máximas diferencias de velocidades

entre 30 y 10 m.

Como se puede observar en la Figura 53b, el análisis estacional indica que en el período invernal se tienen las temperaturas ambientes más bajas y los valores de cizalladura son los más altos, indicando que la atmósfera es más estable.



(a)



(b)

Figura 53. Patrones diarios estacionales de la cizalladura del viento (a) y la temperatura ambiente (b).

1.2.4 Energía eléctrica producida por el aerogenerador.

La generación eléctrica del aerogenerador se analizó a través del comportamiento de la corriente y voltaje. En la que Figura 54 se presentan los doce patrones mensuales que describen la corriente generada en el período, donde se puede apreciar que en su mayoría estos patrones tienen un comportamiento similar al de la velocidad del viento.

En particular se tiene que durante los meses de diciembre y enero, el desempeño del aerogenerador y la contribución de la electricidad fue notablemente más alta con respecto a otros meses, esto debido a que igual se registraron velocidades de viento altas. Este comportamiento de la generación de energía eléctrica es inverso a la generación fotovoltaica para estos meses debido a un bajo nivel de radiación solar disponible, como se demostró en la sección anterior.

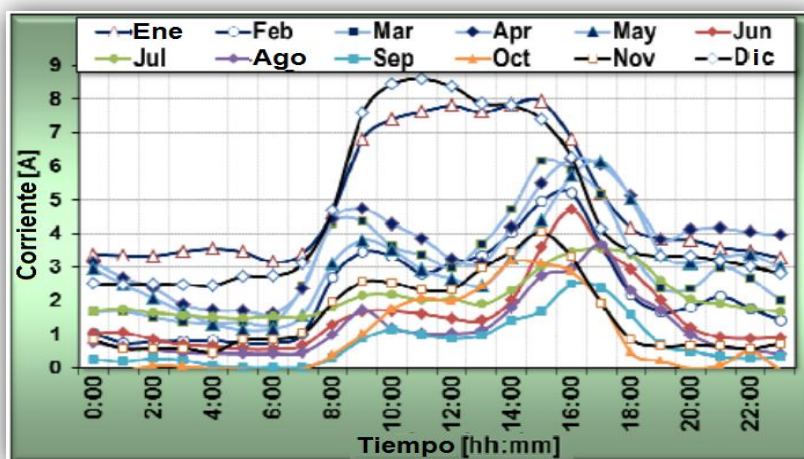


Figura 54. Promedios horarios para cada mes de la corriente eléctrica producida por el aerogenerador.

Es importante notar que los meses de mayor generación de corriente eléctrica, coinciden con los meses en los que la atmósfera es más estable, ver Figura 53, indicando que ésta última es una variable importante que afecta directamente al patrón de velocidad del viento y por tanto al desempeño del aerogenerador.

Al integrar los perfiles de la corriente eléctrica y el voltaje producido durante todo el período en una misma gráfica (Figura 55), y en el mismo ciclo diario, se puede apreciar de forma más clara la similitud entre los patrones del recurso eólico y de la corriente

eléctrica.

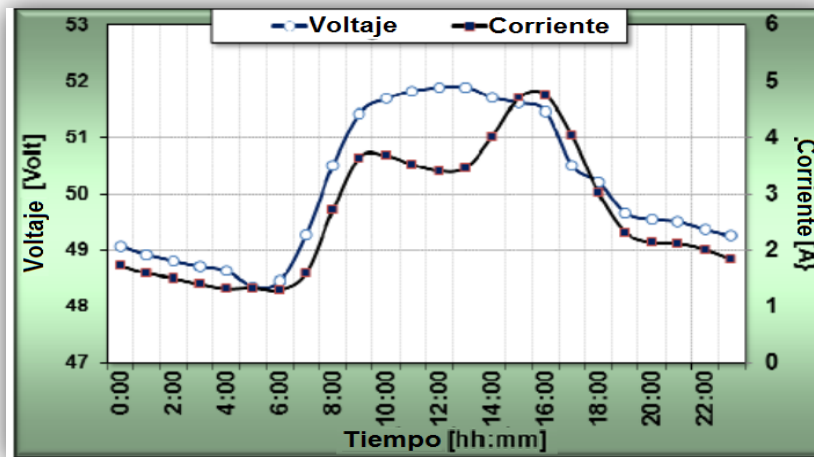


Figura 55. Promedio horarios de todo el periodo de la corriente y voltaje eléctrico producido por el aerogenerador.

1.3 Patrones eléctricos del sistema híbrido Solar-Eólico.

En esta sección se presenta el análisis de los patrones de generación eléctrica del sistema híbrido eólico-fotovoltaico instalado cuando es sometido a la variabilidad, condiciones y características de los recursos descritos en los epígrafes anteriores.

1.3.1 Disponibilidad combinada de los recursos solar y eólico.

1.3.1.1 Patrón diario de los recursos combinados

En la Figura 56 se aprecia que la disponibilidad combinada de los recursos solar y eólico es mayor que si fueran aprovechadas de manera independiente. Esto se debe a que los picos de mayor disponibilidad para ambos recursos no se presentan al mismo tiempo, es decir, la disponibilidad del recurso solar es mayor alrededor de mediodía (radiación solar directa de $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y global de $700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) mientras que la mayor disponibilidad del recurso eólico se presenta en la tarde-noche ($6.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Esto implica que se tendrá una

mayor disponibilidad diaria del sistema para la generación eléctrica.

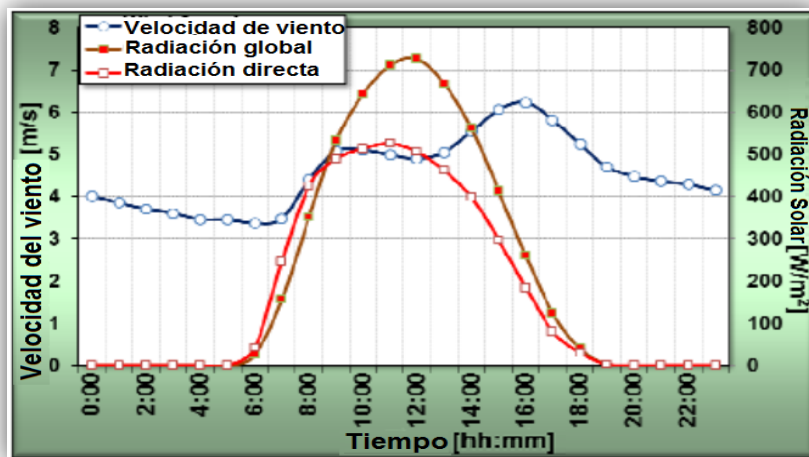


Figura 56. Promedios horarios del ciclo diario de la radiación solar y la velocidad del viento en el periodo de estudio.

1.3.1.2 Patrón anual del recurso híbrido

En el caso del comportamiento de los patrones estacionales de los recursos combinados, la Figura 57 muestra que la disminución de los promedios mensuales en las velocidades del viento en el mes de mayo tiene lugar simultáneamente con el máximo de la disponibilidad de radiación solar global, por otro lado se observa que los valores mínimos de los promedios mensuales de la velocidad del viento se registran entre los meses de agosto y septiembre, el cual coincide cuando la radiación solar global registra su máximo secundario en el patrón anual.

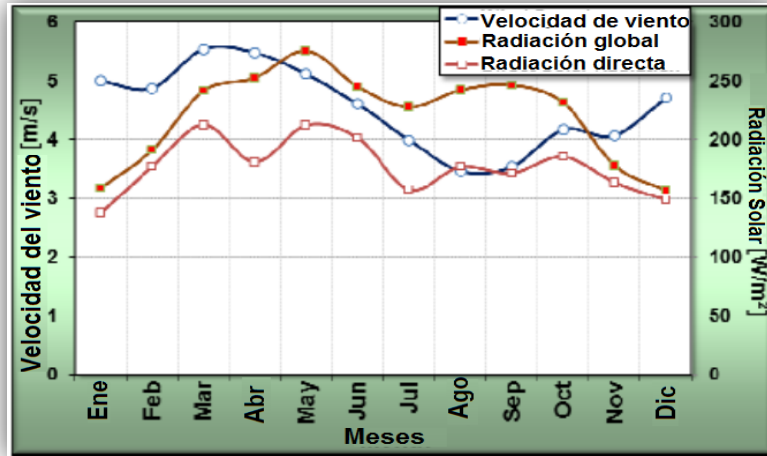


Figura 57. Promedios mensuales de la radiación solar y la velocidad del viento en el período de estudio.

Estos resultados son similares a los obtenidos por Qashou [40] en el que se analizaron datos de radiación solar y de la velocidad del viento en un área determinada, evaluando la disponibilidad de la energía eólica y solar. Como resultado concluyeron que los recursos de energía solar y eólica se compensan entre ellos.

1.3.2 Comportamiento de los patrones de generación eléctrica del sistema híbrido.

En el presente epígrafe se realizó un análisis del comportamiento de la generación eléctrica del sistema híbrido sometido a los patrones del recurso solar-eólico presentes en la zona.

En cuanto al comportamiento combinado de la corriente, la Figura 58 muestra que en el período nocturno (entre las 7 pm y las 6 am) la generación de energía es baja, alrededor de los 2 Amp, dominada ligeramente por la generación eólica. En el período diurno, el máximo de generación se presenta aproximadamente a las 11 am, siendo la corriente eléctrica generada por el sistema fotovoltaico la de mayor contribución en el sistema (4 veces mayor). Entre las 7 am y las 5 pm, la aportación de la generación fotovoltaica fue mayor que la eólica.

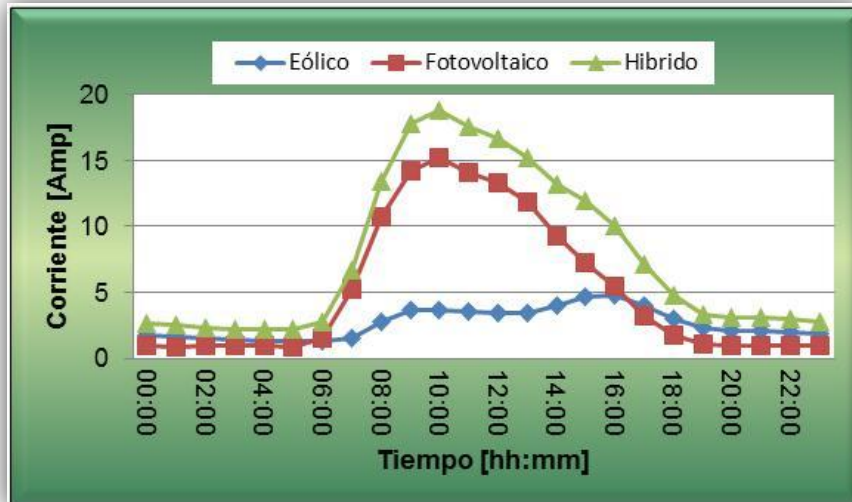


Figura 58. Promedios horarios de todo el periodo de la corriente eléctrica producida por el sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

Los valores obtenidos de generación eléctrica indican que los sistemas no trabajaron a su máxima capacidad.

El arreglo fotovoltaico puede proporcionar hasta 32 Amp., pero el máximo de la corriente que fue medida, en el pico diurno, fue de 15.2 Amp. Esto se debió a que la carga de 490 W a la que fue sometido el sistema, no demandó más energía eléctrica. Se puede concluir que el arreglo fotovoltaico trabajó a un 47.5 % de su capacidad de generación.

La capacidad de generación eléctrica máxima del generador eólico es de 12.5 Amp. Y en este estudio se pudo registrar un máximo de 4.75 Amp. Esto indica que el aerogenerador trabajó a un 38% de su capacidad.

Una explicación del comportamiento combinado en la generación de energía es que los dos sistemas dependen de la disponibilidad de sus respectivos recursos. El aerogenerador entregó de manera instantánea toda la energía que generó y esta no fue suficiente para satisfacer la demanda, pero no se pudo generar más, debido a la limitación del recurso eólico. El arreglo fotovoltaico pudo completar la energía demandada por las cargas sin llegar a su máxima capacidad de generación (estos sistemas tienen la característica de entregar de manera instantánea solamente la energía requerida).

En las Figuras 59 y 60 se muestran los comportamientos de la generación eléctrica en el sistema híbrido para los meses de menor (septiembre) y mayor (diciembre) generación, respectivamente.

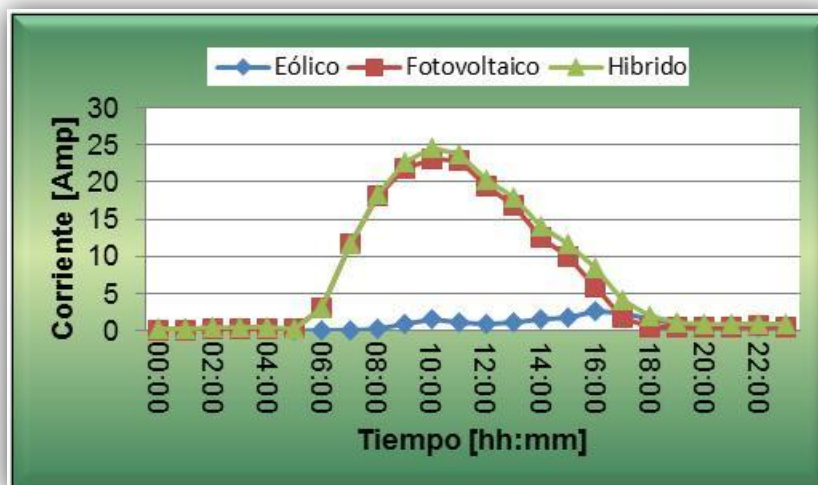


Figura 59. Promedios horarios para el mes de septiembre, cuando se registró la mayor generación del arreglo fotovoltaico y la mínima del generador eólico.

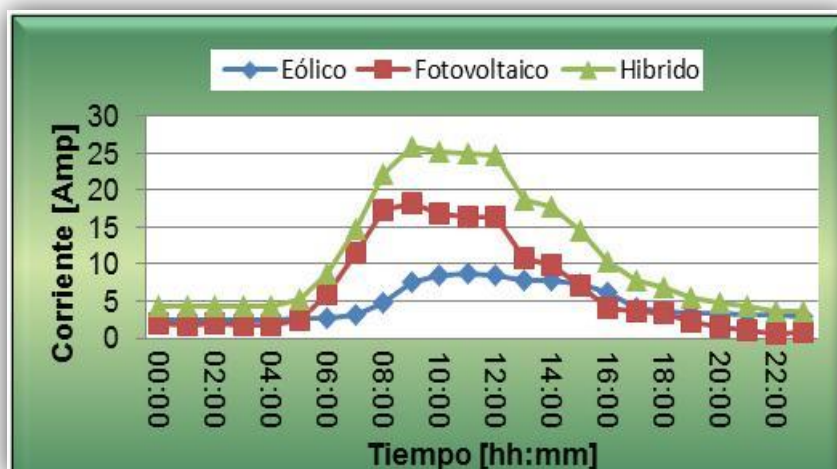


Figura 60. Promedios horarios para el mes de diciembre, cuando se registró la mayor generación del eólico y la mínima de arreglo fotovoltaico

En el mes de septiembre, aun cuando en la región se está en período de huracanes, se pudo observar que la generación eólica fue la mínima (de todo el año). Las características de velocidad y dirección de este recurso, en esta época, no son propicias para su

aprovechamiento como recurso eólico.

Debido a esto, el arreglo fotovoltaico fue el que proporcionó la energía eléctrica demandada por la carga.

En el caso del mes de diciembre, fue cuando se presentó la máxima generación de energía eólica (mayor estabilidad atmosférica, mayores velocidades del viento) y la generación por el arreglo fotovoltaico fue menor que en el mes de septiembre.

Se concluye que la generación eléctrica del arreglo fotovoltaico, en este sistema híbrido en particular, fue modulada por la generación de energía eléctrica del aerogenerador.

Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que para una producción comercial de energía eléctrica con sistemas híbridos, los elementos que lo componen deben de ser optimizados para que trabajen a sus capacidades óptimas ya que si son subutilizados se incurrirían a costos excesivos de instalación y operación.

CONCLUSIONES

Hasta donde se sabe, este es el primer trabajo realizado en el Estado, enfocado al estudio combinado de los recursos solar y eólico para la generación eléctrica en un sistema híbrido. Los resultados demostraron que la disponibilidad de la energía solar y la energía eólica se compensan entre ellas a lo largo del día y durante las estaciones del año.

Se observó que el análisis de la frecuencia de distribución de los vientos por direcciones es una herramienta útil para identificar los patrones térmicos en los módulos fotovoltaicos y poder predecir posibles caídas de rendimiento de los arreglos por efectos de temperatura. En nuestro caso, la temperatura no tuvo efectos en la generación eléctrica del arreglo fotovoltaico.

Los patrones de cizalladura demostraron un patrón con promedios mínimos en la primavera y el otoño, cuando se registran los meses de mayor temperatura ambiente en la zona de estudio. Al mismo tiempo se tiene que la atmósfera en la zona de estudio se encuentra en estado inestable durante la mayor parte del día, disminuyendo su influencia en las horas cercanas a la media noche. Durante los meses de diciembre y enero es cuando se presenta la mayor estabilidad de la atmósfera.

Los patrones de generación eléctrica del arreglo fotovoltaico, en el sistema híbrido estudiado, fueron modulados por los de la generación de energía eléctrica del aerogenerador.

El norte de la Península de Yucatán tiene un potencial eólico útil para sistemas de baja potencia y un potencial de recurso solar alto que permite la aplicación de sistemas fotovoltaicos (bajo un esquema de sistema híbrido) para proporcionar una mayor fiabilidad en la generación de energía eléctrica.

La metodología utilizada en este trabajo para analizar los patrones de generación eléctrica de los sistemas híbridos puede ser aplicada en otros sistemas, en otros sitios, y también como trabajo previo para su optimización.

PERSPECTIVAS

Extender las mediciones a períodos de varios años para incrementar la certeza de la estadística de los resultados obtenidos.

Realizar un estudio en el que se contemplen diferentes patrones de cargas e incorporar la influencia del banco de baterías en el comportamiento del sistema híbrido.

Desarrollar un modelo de generación de energía para la optimización de los sistemas híbridos.

Incorporar un análisis de viabilidad económica de la implementación de éstos sistemas en la región.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, Análisis de 12 tecnologías para mitigar emisiones de gases de efecto invernadero, México, 2007, Sitio Web de SEMARNAT, activo 15 febrero del 2012: <http://www.SEMARNAT\Instituto Nacional de Ecología.htm>
- 2 R. P. Mukund, Wind and Solar power systems, Design, Analysis, and Operation, Taylor & Francis group, Edit.; New York, 2006; Second Ed, 11-19.
- 3 R. P. Mukund, Wind and Solar power systems, Design, Analysis, and Operation, Taylor & Francis group, Edit.; New York, 2006; Second Ed, 143-161.
- 4 GREENPEACE & EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (EWEA) & ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES DE ENERGÍAS RENOVABLES; Viento Fuerza 12; Bélgica, 2001, 4- 24.
- 5 M. Borja Díaz; O. Jaramillo Salgado; F. Mimiaga Sosa. Primer Documento Eoloeléctrico del Corredor del Istmo de Tehuantepec; México, 2005; Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- 6 M. Díaz Ocheita. Determinación del Potencial Energético del Viento en un Punto de la Zona Norte de la Ciudad de Mérida, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México, 2004.
- 7 R. Soler Bientz. Evaluación del potencial solar y eólico en el estado de Yucatán. Reporte de Resultados Preliminares al Gobierno del Estado de Yucatán, Laboratorio de Energía, Facultad de Ingeniería de la UADY, México, 2005, 1-12.
- 8 M. Tomas, Solar Electricity, John Wiley & Sons, LTD, Edit.; Chichester, England 2005; Second Ed, 23-45.
- 9 J.F. Duffy & W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, LTD, Edit.; Madison, Wisconsin 1991; Second Ed, 3-13.
- 10 S. Zekai Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques, Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy, Springer-Verlag London Limited, Edit.; España 2008, 47-85.
- 11 S. Zekai, Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques, Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy, Springer-Verlag London Limited, Edit.; España 2008, 21-34.

- 12 M. Acevedo Escalante. Evaluación Preliminar de la Radiación Solar para las Condiciones del Estado de Yucatán, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. México, 2006.
- 13 D. Y. Goswami. Principles of solar engineering, Edit. Taylor & Francis, Philadelphia, 1999.
- 14 S. Wieder. An introduction to solar energy for scientists and engineers. Edit. Krieger Publishing Company, 1992, Malabar Florida.
- 15 J.F. Duffy & W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process, John Wiley & Sons, LTD, Edit.; Madison, Wisconsin 1991; Second Ed, 250-323.
- 16 L. Antonio and H. Steven, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, LTD, Edit.; Sussex, England 2003; 45-60.
- 17 Danish Wind Industry Association, Guide Tour on Wind Energy, Suiza, Sitio Web activo 15 febrero del 2012: www.windpower.org
- 18 V. Nelson. Wind Energy and Wind Turbines. 2000, EE.UU.: Alternative Energy Institute, West Texas A&M University.
- 19 B. Tony, S. David, et al, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, LTD, Edit.; Chichester, England 2001; 11-38.
- 20 A. S. Monin and A. M. Obukhov. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. Tr. Geofiz. Inst. Akad. Nauk SSSR, 1954, 151, 163–187.
- 21 T. Foken. 50 Years of the Monin-Obukhov similarity theory, Boundary-Layer Meteorology, 2006, 119, 431–447.
- 22 J. A. Businger, J. C. Wyngaard, Y. Izumi, E. F. Bradley. Flux Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. Journal of Atmospheric Sciences. 1971; 28: 181–189.
- 23 U. Högström. Nondimensional Wind and Temperature Profiles. Boundary Layer Meteorology 1988; 42: 55–78.
- 24 G. Nottola, S. Diaf and L. Stoyanov. Hybrid Photovoltaic/Wind Energy Systems for Remote Locations, Energy Procedia 6, 2011, 666–677.
- 25 J. H. Lienhard IV and V. Lienhard. A Heat Transfer Textbook, John Wiley & Sons, LTD, Edit.; Third Edition, Cambridge, Massachusetts, U.S.A. 2003; 3-35.
- 26 H. S. Jung, G. Y. Byung. Performance estimation and evaluation of residential grid-

connected PV system, 2008, 36 th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego Cal. USA.

27 O. Solís. Herramientas de análisis para simulación de sistemas híbridos, XXVII Semana Nacional de Energía Solar de la Asociación Nacional de Energía Solar de México (ANES), México, 2000.

28 H. Mahmoudi; Weather data and analysis of hybrid photovoltaic-wind power generations systems adapted to a seawater greenhouse desalination unit designed for arid coastal countries, Desalination, 2008, 119-223.

29 J.P. Reichling, F.A. Kulacki; Utility scale hybrid wind-solar thermal electrical generation: A case study for Minnesota. Energy 33, 2008, 632-645.

30 A. Mani, S. Rangarajan. Solar Radiation over India. Allied Pub., New Delhi, 1982.

31 S. Kamaruzzaman, I. Z. Mohd et al, 2009, Performance of a PV-Wind Hybrid System for Hydrogen Production, Renewable Energy 34, pp 1973-1978.

32 L. Arribasa. PV–wind hybrid system performance: A new approach and a case study, Renewable Energy, Volume 35, Issue 1, January 2010, Pages 128-137.

33 S. Salwan, K. Dhrab, K. Sopian. Electricity generation of hybrid PV/wind systems in Iraq, Renewable Energy 35, 2010, 1303–1307.

34 K. N. Sanjoy, R. G. Himangshu. A wind–PV-battery hybrid power system at Sitakunda in Bangladesh, Energy Policy 37, 2009, 3659–3664.

35 M. Villagrana, J. Castro. Análisis Comparativo de la Radiación Solar en Zacatecas, Semana Nacional de Energía Solar, Guanajuato México, SNES2010-ERE-013, 2010.

36 E. Zawilska, M.J. Brooks., An assessment of the solar resource for Durban, South Africa, Renewable Energy, 36, 2011, 3433-3438.

37 R.N. Farrugia. The wind shear exponent in a Mediterranean island climate, Renewable Energy, 2003, 28(4), 647-653.

38 S. Rehmana and N.M. Al-Abbadib. Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran, Saudi Arabia, Renewable Energy, 2007, 32, 738-749.

39 S. Rehmana and N.M. Al-Abbadi. Wind shear coefficients and their effect on energy production, Energy Conversion and Management, 2005, 46(15-16), 2578-2591.

40 M. Qashou, H. El-Mulki, A. Jaradat, R. Ta'ani, Compilation and evaluation of solar and

wind energy resources in Jordan, Solar & Wind Technology, Volume 3, Issue 4, 1986, Pages 293-304, ISSN 0741-983X, 10.1016/0741-983X(86)90009-3.

ANEXOS

Anexo A. Características técnicas - operativas de los sistemas de medición y caracterización de los parámetros eléctricos.

Tabla 8. Especificaciones del adquiridor de datos CR10X.

Tipos de señales de monitoreo.	
Señales simples	Determinadas por dos terminales: una terminal para la señal V_1 y la otra como referencia (0 V), (64 puertos).
Señales diferenciales	Determinadas por la diferencia de dos terminales: una terminal para una señal V_1 y la otra para una señal V_2 , (32 puertos),
Señales pulsantes	Determinadas por dos terminales: una terminal para la señal pulsante V_1 y la otra como referencia (0 V), (15 puertos).
Características de operación.	
Rango del voltaje de entradas en los canales de monitoreo	Mínimo: -2.5 VCD Máximo: 2.5 VCD
Frecuencia de monitoreo	Mínimo: 1/64 seg (64 Hz) Máximo: 2.5 Hrs (1×10^{-4} Hz)
Voltaje de alimentación	+ 12 VCD
Memoria interna	Memoria flash de 128 kbytes para almacenar el sistema operativo. Memoria estándar 128 kbytes SRAM para almacenar datos.
Modelo del procesador	Hitachi 6303
Exactitud de su reloj interno	± 1 min/mes
Salidas de alimentación a otros dispositivos	± 2.5 VCD/VCA, +5 VCD, +12 VCD
Puertos	Analógicos (entrada) y digitales (entrada/salida).

Tabla 9. Características técnicas del sensor de corriente CSLA2CD.

Característica	Especificación
Alimentaciones	+12 VCD, G
Rango de señal de entrada	0 A – 79 A (CD Y CA)
Rango de señal de salida	0 VCD – 6 VCD
Margen de error	$\pm 2\%$.

Tabla 10. Características técnicas del transductor de corriente y voltaje para las señales en CD.

Característica	Especificación
Alimentaciones	+12 VCD, -12 VCD, G
Rango de señales de entrada	Corriente: 0 VCD – 6 VCD Voltaje: 0 VCD – 150 VCD
Rango de señales de salida	Corriente: 0 VCD – 2 VCD Voltaje: 0 VCD – 2 VCD
Margen de error	Corriente: $\pm 1\%$ Voltaje: $\pm 0.1\%$
Factores de calibración	$I(A) = 0.105[V_{trans}(mV)] - 115$ $V(V) = 75[V_{trans}]$

Tabla 11. Características técnicas del transductor de corriente en CA.

Característica	Especificación
Alimentaciones	+12 VCD, -12 VCD, G
Rango de señales de entrada	0 VCD – 6 VCD
Rango de señales de salida	0 VCD – 2 VCD
Margen de error	$\pm 1\%$
Factor de calibración	$I(A) = 48.04[V_{trans}(mV)] - 0.27$

Tabla 12. Características técnicas del transductor de voltaje en CA.

Característica	Especificación
Alimentaciones	+12 VCD, -12 VCD, G
Rango de señales de entrada	118 VCA – 122 VCA
Rango de señales de salida	0.9 VCD – 1.1 VCD
Factor de calibración	$V_{CA}(V) = 118.81 [V_{CD}(V)]$

Anexo B. Características técnicas - operativas de los sistemas de medición y caracterización de los recursos solar y eólico.

Tabla 13. Características operativas de la estación solarimétrica y características técnicas del piranometro y pirheliometro instalado.

Características de la estación solarimétrica		
Parámetro.	Valor	
Precisión	< 0.10°	
Repetitividad	< 0.05°	
Resolución	< 0.036°	
Velocidad	Mayor a 2.50°/s	
Aceleración	Mayor a 9°/s ²	
Rotación	540° azimuth 90° / 320 ° Zenit	
Características técnicas del piranometro y pirheliómetro		
Parámetro	Pirheliometro	Piranometro
Rango espectral	200-400 nm	305-2800 nm
Sensibilidad (nominal)	0.011	4-6mV/W/m ²
Tiempo de respuesta (1/e)	2 s	12 s
Apertura total de ángulo de vista	5° ±0.2°	N / A

Tabla 14. Características operativas de los sensores empleados para la caracterización del recurso eólico presente en el sitio de instalación del sistema híbrido de estudio.

Especificaciones técnicas	Sensores		
	Anemometro	Flecha	Temperatura
	RM Young 3101	RM Young 3101	Vaisala CS500
Rango de medición	0 to 50 m/s	0° to 360 °	- 40 to 60°C
Threshold	0.5 m/s	0.8 m/s	N / A
Distance constant		N / A	N / A
Rango de temperatura de operación	-50 to 50°C	-50 to 50°C	- 40 to 60°C
Error del sistema	1 %	± 5°	± 0.5°C
Resolución	0.01 m/s	0.1°	0.01°C

Tabla 15. Especificaciones técnicas de los sensores instalados en la torres de medición en el techo donde está localizado el arreglo fotovoltaico.

Especificaciones técnicas.	Sensores		
	Temperatura	Velocidad de viento	Dirección de viento
Rango de medición.	-40 to 60°C	0 to 50m/s	0 to 360°
Velocidad mínima	N / A	0.5m/s	0.8m/s
Constante distancia	N / A	2.3m	N / A
Rango de temperatura operativa.	-40 to 60°C	-50 to 50°C	-50 to 50°C

Anexo C. Los resultados de este trabajo de investigación fueron presentados en los siguientes congresos internacionales del área.

- Soler-Bientz, R., L. Ricalde-Cab, L. Barahona Pérez, J. Carrillo Baeza. (2011). Analysis of the Solar and Wind Resources for Applications in Hybrid Systems in the Yucatan Peninsula. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, USA
- Soler-Bientz, R., L. Ricalde-Cab, L. Barahona Pérez, J. Carrillo Baeza. (2011). Study of a PV-Wind System in Tropical Conditions. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington
- Soler-Bientz, R., L. Ricalde-Cab, L. Barahona Pérez, J. Carrillo Baeza. (2011), Study Of a PV-Wind System in Tropical Condition, ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Denver, Colorado, USA.
- Soler-Bientz, R., L. Ricalde-Cab, L. Barahona Pérez, J. Carrillo Baeza. (2011), Preliminary Study of Thermal Patterns in PV arrays Operating in Tropical Condition, ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Denver, Colorado, USA.

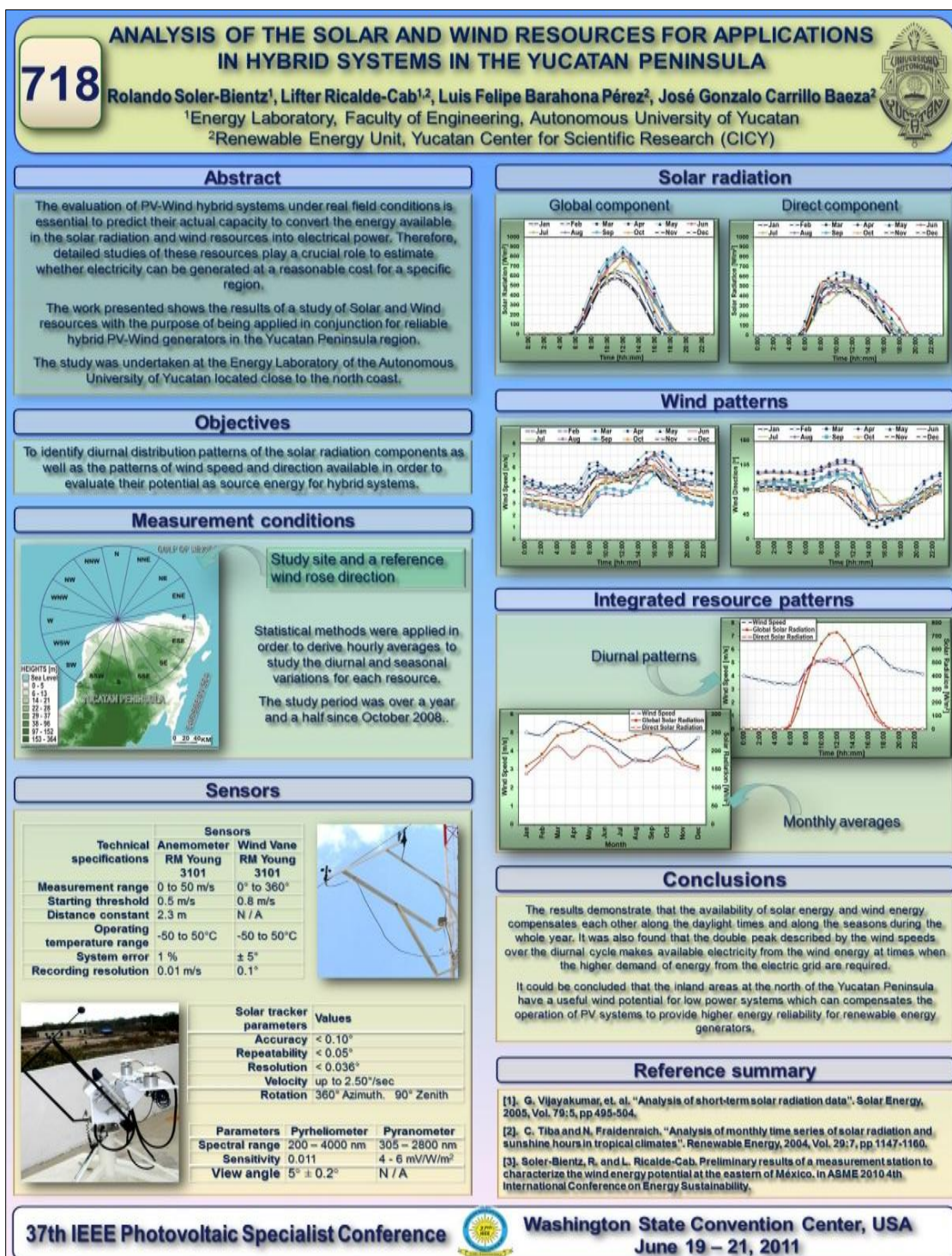


Figura 61. Poster del trabajo “Analysis of the Solar and Wind Resources for Applications in Hybrid Systems in the Yucatan Peninsula”, presentado en el 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, USA.

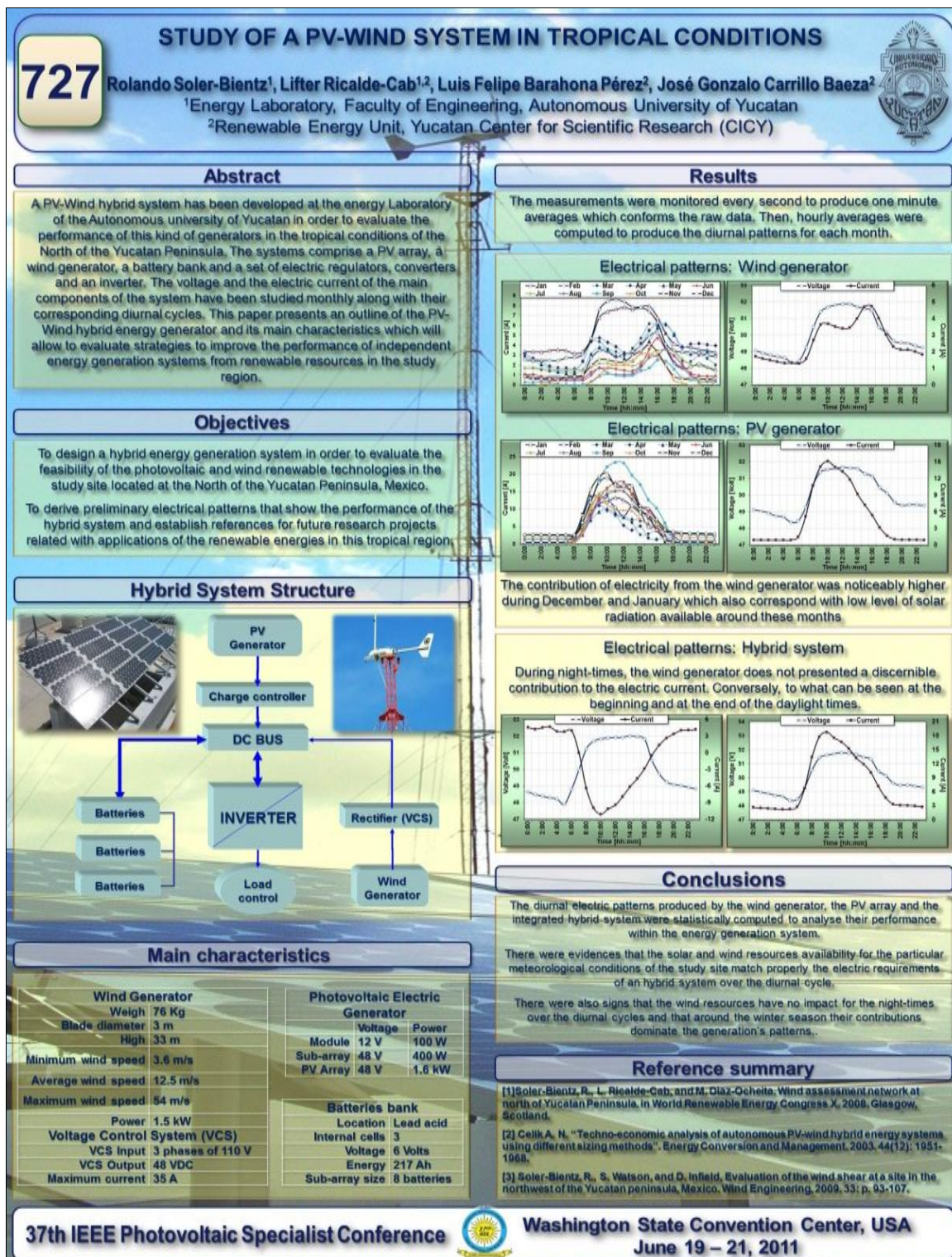


Figura 62. Poster del trabajo "Study of a PV-Wind System in Tropical Conditions", presentado en el 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, USA

STUDY OF A PV-WIND SYSTEM IN TROPICAL CONDITIONS

Rolando Soler-Bientz¹, Lifter Ricalde-Cab^{1,2}, Luis Felipe Barahona Pérez², José Gonzalo Carrillo Baeza²

¹Energy Laboratory, Faculty of Engineering, Autonomous University of Yucatan
Facultad de Ingeniería, Av. Industrias no contaminantes x anillo periférico norte s/n.
CP 97310, Mérida, Yucatán, México.
email: sbientz@uady.mx, sbientz@msn.com

²Renewable Energy Unit, Yucatan Center for Scientific Research (CICY)
Mérida, Yucatán, México.

ABSTRACT

A PV-Wind hybrid system has been developed at the energy Laboratory of the Autonomous university of Yucatan in order to evaluate the performance of this kind of generators in the tropical conditions of the North of the Yucatan Peninsula. The systems comprise a PV array, a wind generator, a battery bank and a set of electric regulators, converters and an inverter. The voltage and the electric current of the main components of the system have been studied monthly along with their corresponding diurnal cycles. This paper presents an outline of the PV-Wind hybrid energy generator and its main characteristics which will allow to evaluate strategies to improve the performance of independent energy generation systems from renewable resources in the study region.

INTRODUCTION

A properly selection and design of renewable sources to be used in an electric generator plays a key role to produce a reliable supply of demanded electricity. In particular if a wind generator is part of the generation system because of the variability of the wind resources [1].

On the other hand, the performance of different photovoltaic (PV) generators, under real conditions of operation, is essential to decide the correct product selection and the precise predictions of their capacity to produce electricity. Considering this, several test infrastructures has been developed to characterize the electrical behavior of a photovoltaic generator under several charge situations based on specific solar radiation, wind speed and temperature conditions [2][3].

The combination of the photovoltaic systems with other electric generators in hybrid systems, allows developing more robust applications. A very robust version of the hybrid systems can be achieved when energy generation systems not only operate with solar radiation, but also include wind energy systems. In this context, technical-economic analyses have been made considering as variables the level of autonomy and the cost of the system [4][5]. These analyses are destined to optimize the operation of these systems and to consider the feasibility

to use them as power plants, maximizing the use of renewable energies demanded by the loads.

This paper introduces the results from the evaluation of the electric patterns produced by a hybrid PV-Wind generation system over a year and a half of operation. This study was undertaken in the tropical conditions of the North of the Yucatan Peninsula at the Faculty of Engineering of the Autonomous University of Yucatan.

PHOTOVOLTAIC ENERGY GENERATOR

The PV generator was installed on the roof of the Energy Laboratory at the Faculty of Engineering using PV modules of mono-crystalline Silicon. Considering our geographical position, Mérida city, the system was oriented with 21 degrees of inclination with respect to the horizontal plane in south direction. The electrical generation system was completed with a set of 4 sub-arrays connected in parallel configuration. Each sub-array has four 100 Watts PV modules in serial connection that produce nominally 400 Watts. Figure 1 shows an image of this PV system.



Figure 1. Photovoltaic energy generator comprising four sub-arrays of four PV modules each

The following table (Table 1) summarizes the electrical properties of each component of photovoltaic electric generator:

Table 1. Electrical properties of the PV energy generator

	Module	Sub-array	PV Array
Voltage	12 V	48 V	48 V
Power	100 W	400 W	1.6 kW

WIND ENERGY GENERATOR

The Wind generator installed has a nominal generation capacity of 1.5 kW. It is a Bergy generator with the following technical characteristics:

Table 2. Main characteristics of the Wind energy generator

Wind Generator	
Weight	76 Kg
Blade diameter	3 m
High	33 m
Minimum wind speed	3.6 m/s
Average wind speed	12.5 m/s
Maximum wind speed	54 m/s
Power	1.5 kW
Voltage Control System (VCS)	
VCS Input	3 phases of 110 V
VCS Output	48 VDC
Maximum current	35 A

Figure 2 shows a picture of this generator. In order to increase the security of the system, a protection mechanism was also installed to disconnect the Wind generator from the hybrid system by means of a three-phase relay. This relay connects a set of electric resistances which dissipate the energy of the wind generator acting by this way as dynamic brake. A connection signal can be produced from the control system in order to connect or disconnect the Wind generator from hybrid system.



Figure 2. Wind energy generator installed on a 33m height mast at the Energy Laboratory site

HYBRID SYSTEM STRUCTURE

The general diagram of the PV-Wind hybrid system has been shown in figure 3 below. The system is comprised by a combination of PV modules (1.6kW of combined PV power) and a wind generator (1.5 kW of power) which are connected by means of their corresponding charge controller to a DC bus. This DC bus is also connected to a batteries bank.

As can be seen below in figure 3, the PV electric generator was connected through a DC bus to the batteries bank by means of a charge controller. This controller monitor the cycles of charge-discharge of the batteries bank avoiding excessive overcharge as well as too deep discharge conditions which could deteriorate the life time of the whole batteries bank.

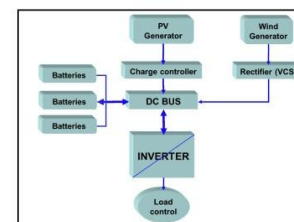


Figure 3. General diagram of the whole PV-Wind hybrid system

RESULTS

The results presented in this section were derived from a dataset recorded since October 2008 containing a year and a half of data. The measurements were monitored every second to produce one minute averages which conforms the raw data. Then, the dataset was filtered to discard errors and hourly averages were computed to produce the diurnal patterns for each month within the study period.

Electric patterns from the wind generator

Figure 4 below presents 12 patterns describing the electric current produced by the Wind generator during the diurnal cycle for each month. The majority of this patterns share many similarities with the wind resource patterns measured for this site in previous researches [1][6].

These similarities could indicate that the electric energy produced by the wind generator from the wind resource was required by the hybrid system during the time it was

available in order to complement electric energy provided by PV array from the solar radiation.

In particular during December and January, the contribution of electricity from the wind generator was noticeably higher which also correspond with low level of solar radiation available around these months, see Figure 6 below, and with the presence of strong wind during this season.

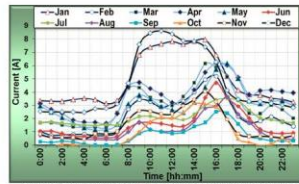


Figure 4. Hourly average for each month of the electric current produced by the Wind generator

The integrated profiles of electric current and voltage produced by the wind generator during the whole study period have been plotted together in Figure 5 over the same diurnal cycle previously presented in Figure 4. In this case is even more clear the similarity between the wind resource cycle and the electric current pattern.

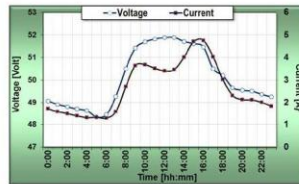


Figure 5. Hourly average over the whole study period of the electric current and voltage produced by the Wind generator

Electric patterns from the PV generator

Similar to the results presented for the electric current produced from the wind, Figure 6 presents the diurnal patterns of each month for the electric current generated by the PV array previously shown in Figure 1.

As was already mentioned, the contribution of electric current around the winter season was dominated by the wind generator therefore the electric current produced by

the PV array was significantly less in intensity while the shape of the patterns didn't follow the solar radiation patterns which was actually described by the months with less wind energy contribution.

It can be also noted that during night-times there was a not null electric current registered with an almost constant flat pattern. This should be the result of residual contributions made by the illumination system installed around the building where the PV array was installed.

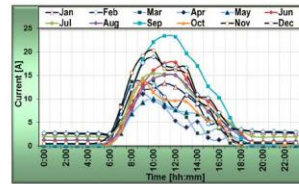


Figure 6. Hourly average for each month of the electric current produced by the PV generator

Figure 7 shows, for the case of the solar energy, the integrated diurnal patterns of electric current and voltage produced by the PV array over the study period. An important detail to be noted is that the peak of the electric current produced by the PV array is located around the 10:00 in the morning instead of at midday when the solar radiation reach its maximum intensity. This is also a sign that the availability of the renewable resources is balanced for the meteorological conditions of the tropical study site.

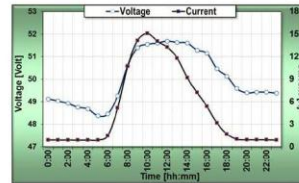


Figure 7. Hourly average over the whole study period of the electric current and voltage produced by the PV generator

HYBRID SYSTEM

As was shown in Figure 3, the hybrid system is complemented with a battery bank which was connected in parallel with the wind and PV generators. Thus, Figure 8 below presents the diurnal pattern for the electric current

and voltage registered by the battery bank over the whole study period. It can be seen that the voltage is raised up to an almost flat level when the voltage regulators of each electrical generator keeps track of the appropriate voltage to be applied during charging times.

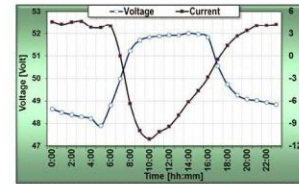


Figure 8. Hourly average over the whole study period for the electric current and voltage registered by the battery bank

On the other hand, the voltage and electric current delivered to the hybrid system by the integrated wind and PV generators have been plotted in Figure 9. It can be appreciated that during the night-times, the wind generator does not presented a discernible contribution to the electric current. Conversely to what can be seen at the beginning and at the end of the daylight times.

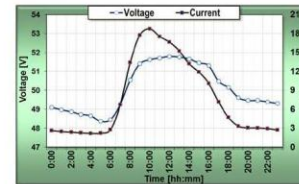


Figure 9. Hourly average over the whole study period of the electric current and voltage produced by the Hybrid PV-Wind system

CONCLUSIONS

A hybrid energy generation system was designed and developed to evaluate the feasibility of the photovoltaic and wind renewable technologies in the study site located at the North of the Yucatan Peninsula, Mexico. These evaluations will serve as references for future research projects related with applications of the renewable energies in this tropical region.

The diurnal electric patterns, produced by the wind generator, the PV array and the integrated hybrid system

were statistically computed to analyze their performance within the energy generation system. There were evidences that the solar and wind resources availability for the particular meteorological conditions of the study site match properly the electric requirements of a hybrid system over the diurnal cycle. There were also signs that the wind resources have no impact for the night-times over the diurnal cycles and that around the winter season their contributions dominate the generation's patterns.

ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to thanks to all the members of the Energy Laboratory because their support to keep operating the whole photovoltaic system. This work is part of the Research project "FING-06-003" developed by the Energy Laboratory of the Faculty of Engineering of the Autonomous University of Yucatán.

REFERENCES

- [1] Soler-Bientz, R., L. Ricalde-Cab, and M. Diaz-Ocheita. Wind assessment network at north of Yucatan Peninsula, in World Renewable Energy Congress X, 2008. Glasgow, Scotland. URL: <http://hdl.handle.net/2134/6046>.
- [2] Durisch Wilhelm, Tille Dierk, Wörz A. and Plapp Waltraud. "Characterisation of photovoltaic generators". *Applied Energy*. 2000. 65(1-4): 273-284.
- [3] Soler-Bientz, R., L.O. Ricalde-Cab, and A.C. Ricalde-Cab. Autonomous PV system to applications in the eastern of Mexico, in PVSC: 2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Vols 1-4, 2008. San Diego, CA, USA: IEEE. DOI: 10.1109/PVSC.2008.4922842.
- [4] Bakos G. C. and Soursoos M. "Techno-economic assessment of a stand-alone PV/hybrid installation for low-cost electrification of a tourist resort in Greece". *Applied Energy*. 2002. 73(2): 183-193.
- [5] Celik A. N. "Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods". *Energy Conversion and Management*. 2003. 44(12): 1951-1969.
- [6] Soler-Bientz, R., S. Watson, and D. Infield, Evaluation of the wind shear at a site in the northwest of the Yucatan peninsula, Mexico. *Wind Engineering*, 2009. 33: p. 93-107.

IMECE2011-64901

PRELIMINARY STUDY OF THERMAL PATTERNS IN PV ARRAYS OPERATING IN TROPICAL CONDITIONS

Rolando Soler-Blentz
 Energy Laboratory FIUADY
 Mérida, Yucatán, México

Llifer Ricalde-Cab
 Energy Laboratory FIUADY &
 Renewable Energy Unit CICY
 Mérida, Yucatán, México

Luis Felipe Barahona Pérez
 Renewable Energy Unit CICY
 Mérida, Yucatán, México

Jose Gonzalo Carrillo Baeza
 Renewable Energy Unit CICY
 Mérida, Yucatán, México

ABSTRACT

This paper presents preliminary results of a field study focused in the study of the heat patterns of a PV array in tropical conditions. The research system is comprised by four sub arrays of four mono-crystalline Silicon PV Modules. The system was installed facing to the South direction in a static configuration according to the geographical location of the study site. A set of temperature sensors were installed on the back of the PV module in order to monitor their thermal patterns on daily basis. Ambient temperature, solar radiation on the PV surface and on the horizontal surface as well as the wind speed and wind direction have been also monitored concurrently with the thermal patterns of the whole PV array under study.

INTRODUCTION

The dark colour of the Solar Cells in a Silicon PV module indicates that the solar radiation not absorbed, by the photo-generation process to create charge carrier, will contribute to increase the temperature of the Cells and the whole PV module. This process creates undesirable high temperatures that diminish the capacity of the PV module to produce electricity. Thus, the practical efficiency of PV generators is usually lower than the reported by the standard operating conditions [1-4].

Therefore the performance of PV modules can be highly influenced by the ambient temperature, especially in tropical inland conditions where high variations in the diurnal thermal pattern can be registered during extended periods along the year. Another atmospheric parameter that could regulate the impact of the air temperature on the PV modules is the wind speed pattern. Heat transfer process stimulated by the Diurnal

wind cycles can help to reduce the potential effects of high ambient temperatures [5][6].

This paper presents preliminary results of a research to study the heat patterns of a PV array in tropical conditions. A set of temperature sensors were installed on the back of the PV module in order to monitor their thermal patterns on daily basis. The ambient temperature, solar radiation on the PV surface and on the horizontal surface as well as the wind speed and direction have been also monitored concurrently with the thermal patterns of the whole PV array under study.

STUDY SITE

The study site is located in Merida city at the North of the Yucatan Peninsula, see Figure 1, in the roof of the Energy laboratory of Faculty of Engineering of the Autonomous University of Yucatan.



Figure 1. Geographical location of the measurement in the North-West of the Yucatan Peninsula, México

Figure 2 below, presents a view of the PV array study in this paper. The system comprises 4 sub-arrays of four PV modules each one oriented in South direction with and inclination of 21 degrees, equivalent to the latitude of the study site. This system will be referenced as PVS with the indexes shown in Figure 2 to identify a particular PV module within the system.

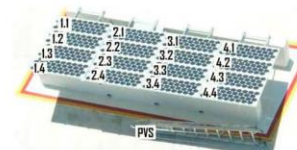


Figure 2. A view of the PV array with the indexes used to identify the PV modules. The North is located downward so the module 11 is facing the South-East direction.

MEASUREMENT SENSORS

The measurement systems was configured around a data-logger which monitor the installed sensors every one second to store averages every one minute during the 7 months of the study period. A total of 8 surface temperature sensors were installed on the back of the PV modules identified in figure 2 as: PVS11, PVS21, PVS31, PVS41, PVS14, PVS24, PVS34 and PVS44. Figure 3 below shows the back of the PV modules with the sensors installed. It should note that although more surface temperature sensors were initially installed, just the results from the referenced sensors will be reported in this study.



Figure 3. Location of the surface temperature sensors installed under the PV modules

The ambient temperature and the wind speed and wind direction were registered with a couple of sensors as can be seen in Figure 4. These sensors were installed, in the same roof

with the PV system, on a 3m height tower in order to avoid potential influences from the roof surface. Table 1 presents a summary of the main operational parameter of these sensors.



Figure 4. Mini-tower installed in the opposite side of the roof supporting an air temperature and a wind sensor

TABLE 1. Technical specifications of the sensors installed on the measurement tower.

Technical specifications	Sensors		
	Temperature	Wind speed	Wind direction
Measurement range	-40 to 60°C	0 to 50m/s	0 to 360°
Starting threshold	N/A	0.5m/s	0.8m/s
Distance constant	N/A	2.3m	N/A
Operating temperature range	-40 to 60°C	-50 to 50°C	-50 to 50°C

The measurement system was completed with the solar radiation sensors; a sensor was installed on the same plane of the PV modules to register the radiation that arrive on the module surfaces. Also, measurements from a solar radiation tracker with sensors for global, direct and diffuse radiation were available for this study. Figure 5 and table 2 below present an image and the technical details of the solar sensor installed on the tracker.



Figure 5. Image of the solar radiation station showing the tracking system and the set of radiation sensors installed.

Table 2. Main technical specifications for the solar radiation sensors.

Parameters	Pyrheliometer	Pyranometer
Spectral range	200-4000 nm	305-2800 nm
Sensitivity (nominal)	0.011	4-6 mV/Wm ²
Full opening view angle	5°±0.2° (acc. to WMO)	N/A
Non-linearity	< ± 0.2%	< ± 0.6%

Averages of the whole values measured every second from the installed sensors were computed, stored and used as raw data to produce the statistical analysis presented in the following sections during a period of 7 months.

RESULTS

SOLAR RADIATION

The hourly averages of solar radiation available during the study period have plotted in Figure 6. It can be seen that the radiation captures on the PV plane increase up to a maximum at midday compared with solar radiation on the horizontal plane (labelled as Global in Figure 6). The result also make evident that there is a high component of diffuse solar radiation in this geographical region which is consistent with the increase in the cloudy days usually encountered over the study period (from November to May).

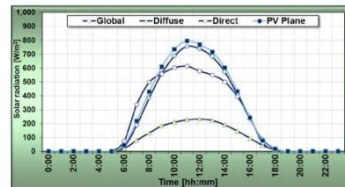


Figure 6. Solar Radiation during the study period on the PV module plane and on the horizontal plane (Global, Diffuse and Direct)

WIND SPEED CYCLES

Figure 7 and Figure 8 below show the monthly behaviour of the diurnal cycles for the wind speed and wind direction respectively over the study period which covers 7 consecutive months since November to May. In the majority of the cases, it can be appreciated a pattern of wind speed with a double peak during daytime and a minimum just before sunrise.

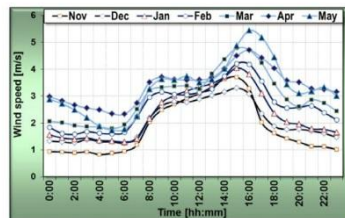


Figure 7. Diurnal patterns of Wind speed for each month in the study period

The wind direction show that the wind blows mainly from East to South-East directions (between 90 and 135 degrees) during the night-time and up to approximately midday when the wind bears to blow from directions around the North where the Gulf of Mexico is located.

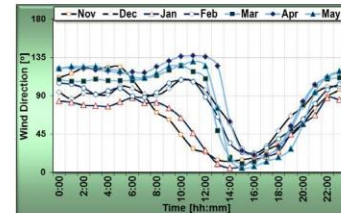


Figure 8. Diurnal patterns of Wind direction for each month in the study period

THERMAL PATTERNS

The diurnal pattern described by the ambient temperature and the temperature of the PV modules within the PV array have been analysed and the results can be seen in figures from 9 to 12.

A sample of the range of variation faced by the surface temperature of a particular PV within the PV array can be observed in Figure 9. In this case, the surface temperature of the module PVS11 located on the east-south side of the PV array (see Figure 2) has been classified in diurnal patterns for each month over the study period. A range of variation of up to 22 degrees Celsius was registered between December and May after midnight.

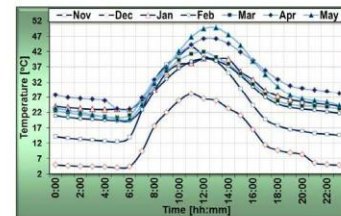


Figure 9. Sample of the diurnal patterns of surface temperature on the PVS11 module for each month within the study period

In order to compare the thermal pattern among the modules within the PV array, Figure 10 presents the average diurnal patterns over the whole study period for eight of the PV modules located at the bottom and top of the PV array, see Figure 2 above. The ambient temperature has been also plotted as reference to visualize the relative behaviour of the surface

patterns along the diurnal cycle. In this case around the 11:00 in the morning, the modules PVS11 and PVS 14 located on the East side of the array (consider that the North is faced downward in figure 2) are able to reduce their surface temperature thanks to the prevailing wind that comes from this direction at midday, see figure 8. On the other hand after 2:00 pm; the modules PVS14, PVS24, PVS34 and PVS44 located on the North side of the array receive the higher wind coming around North directions; see Figure 7 and Figure 8, which allow that their surface temperatures drop down to the lower levels among the whole patterns during night-times.

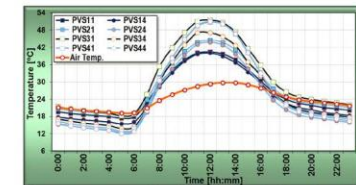


Figure 10. Averages of the diurnal patterns for the surface and ambient temperature sensors during the whole study period

Figure 11 presents the range of variation of the surface temperature within the PV array. It can be appreciated that the wider range of variation is registered at midday while the surface temperature tend to be less heterogeneous just after sunrise and before sunset.

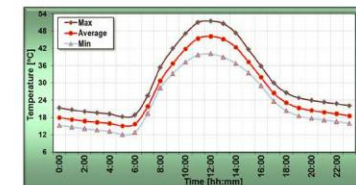


Figure 11. Extreme and average diurnal patterns computed from the whole data measured with all the installed sensors.

Finally, Figure 12 shows that the surface temperature among PV modules within the array can be vary up to 12 degrees Celsius around midday which is close to the double of the temperature range registered during night-times. It can be also noted that the range of variation remains relative stable in the absence of solar radiation.

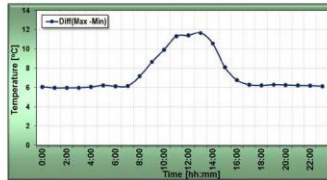


Figure 12. Range of variation for the diurnal pattern registered among the installed sensors over the whole study period

CONCLUSIONS

A preliminary study has been undertaken to analyse the behaviour of the diurnal thermal patterns produced with a 4x4 PV array considering the influence of the solar radiation and the wind on the convection process at the North of the Yucatan peninsula.

The wind speeds have shown a pattern with a double peak during day light time which should be produced by the influence of the sea and land breeze.

Variations in the Surface temperature of a PV module can reach up to 22 degrees Celsius between winter and summer times.

The wind intensity and the wind directional patterns play a crucial role in the heat transfer by convection through the whole PV array conditioning how the solar radiation varies the surface temperatures. It was also found that the variations of surface temperature among the PV array modules at midday are up to twice higher than during night-time.

ACKNOWLEDGMENTS

Authors would recognise the commitment of the Energy Laboratory team at the Autonomous University of Yucatan who have kept the measurement system in operation throughout the study period. This work was developed as part of the goals of the research projects "FING-05-016" at the Faculty of Engineering of the Autonomous University of Yucatan.

REFERENCES

- [1] M. Mattei, G. Notton, C. Cristofari, M. Muselli and P. Poggi, Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance, *Renewable Energy* 31 (2006), pp. 553–567.
- [2] R. Chenni, M. Makhlouf, T. Kerbache and A. Bouzid, A detailed modelling method for photovoltaic cells, *Energy* 32 (2007), pp. 1724–1730.
- [3] T. Bergene and O.M. Lovvik, Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells, *Solar Energy* 55 (1995), pp. 453–462.

[4] Brinkworth, B.J., Sandberg, M., 2006. Design procedure for cooling ducts to minimize efficiency loss due to temperature rise in PV arrays. *Solar Energy* 80, 89–103.

[5] R. Soler-Bientz, F. Gómez Castro, L. Ricalde Cab, "Computational Model to Study the Performance of PV Modules under Non-Homogeneous Radiation Conditions", 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2008, Valencia, Spain, pp. 2899-2902.

[7] R. Soler-Bientz, F. Gómez Castro, L. Ricalde Cab, "Thermal Computational Model to Analyse PV Modules: Preliminary Results", *ASME 4th International Conference on Energy Sustainability*, 2010, Phoenix, USA.

IMECE2011-65402

ANALYSIS OF THE THERMAL VERTICAL PROFILES AT AN INLAND SITE IN THE NORTH OF YUCATAN PENINSULA

Rolando Soler-Bientz
 Energy Laboratory FIUADY
 Mérida, Yucatán, México

Lifter Ricalde-Cab
 Energy Laboratory FIUADY &
 Renewable Energy Unit CICY
 Mérida, Yucatán, México

Luis Felipe Barahona Pérez
 Renewable Energy Unit CICY
 Mérida, Yucatán, México

José Gonzalo Carrillo Baeza
 Renewable Energy Unit CICY
 Mérida, Yucatán, México

ABSTRACT

The power generated by a Wind Energy Conversion System (WECS) is closely dependent on the quality of the wind dataset used to derive the wind energy potential. Wind speed data measured in meteorological stations are often used initially for this purpose but this data is measured only at 10m above ground level. The wind speed at the turbine hub height must then be determined from estimates of the site wind shear based upon locally available data. The simplicity of the power law has made it perhaps the most widely applied model of wind shear. Nevertheless, atmospheric conditions and geographical characteristics of a particular region can create important variations in the wind shear patterns. This paper presents a comprehensive analysis of the wind and temperature patterns at a specific site at the North of the Yucatan Peninsula in terms of the directional, diurnal and seasonal cycles. An analysis of the rate of change of temperature showed a correlation between wind speed and rate of change of temperature reflecting stable conditions during periods of cooling and unstable conditions during periods of heating.

INTRODUCTION

The power generated by a Wind Energy Conversion System (WECS) is closely dependent on the quality of the wind dataset used to derive the wind energy potential as well as the condition in which the data was measured. Often, measurements at 10m above the ground level (a.g.l.) from meteorological stations can be used initially to produce preliminary wind resource assessments. Then, wind speeds at the turbine hub height (frequently around 30m and 100m height) must be computed from estimates of the site wind shear based upon locally available data. Generally, the wind shear

patterns are conditioned, among other parameters, by the stability properties of the Atmospheric Boundary Layer and geographical characteristics of the study region and can be should be calculated using the Monin-Obukhov similarity theory [0][0]. In the particular case of the neutral atmospheric stability conditions the simple adiabatic log law can successfully predict the vertical wind profiles.

When there is not enough data available to apply the Monin-Obukhov theory, the vertical profile can be computed alternatively using the power law. Farrugia [3] studied the wind shear from measurements at two different heights on Malta's South West coast, in the central Mediterranean, reporting that the monthly values decrease in summer and increase in winter and that the daily pattern has a period of a minimum from 9:00 to 15:00 and a period of a maximum from 21:00 to 5:00. Similar diurnal patterns were found by Rehmana and Al-Abbadib during 3 years [4] and 5 years [5] for a site in the coast of the Gulf region of Saudi Arabia. In this case, no regular seasonal trends were identified.

Kirchhoff and Kaminsky [6] remarked that basic errors could be introduced because of the random nature of the wind speed and the deterministic characteristic of the power law when computing the wind shear from measured wind speeds at two different heights. Kirchhoff and Kaminsky made 173 wind speed measurements to study the wind shear so as to be statistically significant. Their data analysis indicated a normal distribution for the wind shear in three of the synoptic weather categories: I (in a warm section), III (behind a cold front) and IV (under a continental polar or arctic high).

This paper presents an analysis of the wind speed and wind shear at a specific site in the Yucatan Peninsula in terms of the directional, diurnal and seasonal patterns. In particular the

frequency distribution of key parameters is examined to account for the diverse wind shear characteristics identified.

STUDY SITE

The meteorological tower is installed within the Science and Engineering Campus of the Autonomous University of Yucatan which is located close to the north-west coast of the Yucatan Peninsula, at the eastern of Mexico, see Figure 1 below. As can be appreciated the proximity of the Gulf of Mexico should be strongly influenced the climate on the measurement site.



Figure 1. Geographical location of the measurement in the North-West of the Yucatan Peninsula, Mexico

The Yucatan Peninsula is mainly flat and the measurement site which is located at around 25km from the North shore is just about 7m a.m.s.l. (above the mean sea level). Table 1 lists the main geographical parameters for the measurement site.

TABLE 1. Geographical parameters of the study site

Site parameters	Values
Geographical coordinates	21°02'55.69" N, 89°38'36.68" W
Site height a.m.s.l.	7m
Distance from the near coast	25.3km (Northerly direction)
Measurement heights a.g.l.	10m and 30m

An aerial view of the measurement tower is shown in Figure 2 to identify the relative positions of the mast and the surrounding obstacles. The immediate surroundings, especially at 10m height, are of importance because of their influence on the wind patterns across the site, particularly the wind speeds and the wind shear.

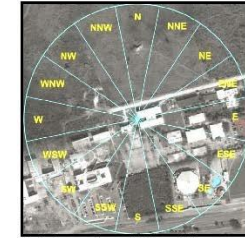


Figure 2. A close up view of 400m x 400m area around the measurement site with the directional sectors centered on the measurement tower

MEASUREMENT SYSTEM

A data-logger monitor the data measured from the sensors to store averages every 10 minutes. The sensors include two sets of anemometer and wind vane, an ambient temperature. The basic operational characteristics of the sensors used are shown below in Table 1. The cup anemometers were installed at 10m and 30m a.g.l. while the ambient temperature was at 10m a.g.l. The wind sensors were fully calibrated by the manufacturer.

TABLE 2. Technical specifications of the sensors installed on the measurement tower.

Technical specifications	Sensors		
	Temperature Vaisala CS 500	Anemometer RM Young 3101	Wind Vane RM Young 3101
Measurement range	-40 to 60 °C	0 to 50m/s	0 to 360 °
Starting threshold	N/A	0.6m/s	0.8m/s
Distance constant	N/A	2.3m	N/A
Operating temperature range	-40 to 60 °C	-50 to 60 °C	-50 to 50 °C
System error	±0.5 °C	1%	±5°
Recording resolution	0.01 °C	0.01m/s	0.1°

The 10 minutes averages were computed from data measured at 2 second intervals from the installed sensors. Then statistical analysis was applied to derive the directional, diurnal and seasonal patterns.

RESULTS

FREQUENCY DISTRIBUTIONS

Using 16 directional sectors, the data measured was classified for each hour of the diurnal cycle to extract the patterns described by the distribution of the wind over the study period. The results were grouped in three time periods according to the daytime/night-time and rate of change of temperature:

- 1) from 21:00 to 8:00 for predominantly night-time with decreasing ambient temperatures, see Figure 3
- 2) from 9:00 to 14:00 for predominantly day-time with increasing ambient temperatures, see Figure 4, and
- 3) from 15:00 to 20:00 for predominantly day-time and decreasing ambient temperatures, see Figure 5.

It can be seen that less than 8% of the wind comes from the West to the North-East in all the classified cases. During the night, the wind blows over the land between the South-East and the South-West sectors. Then when morning times arrive, the contribution of these sectors decrease and from 11:00 a clear contribution around the East-South-East sector, sea breeze, begins to take over the frequency distribution up to around 20:00 in the night. This behaviour is fairly typical of wind patterns thermally driven that produce land-sea and sea-land breezes.

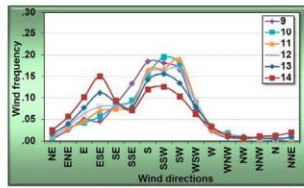


Figure 3. Frequency distribution of wind during predominantly night-time with decreasing ambient temperatures

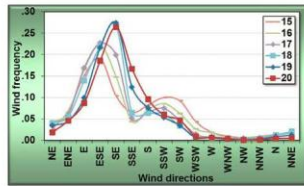


Figure 4. Frequency distribution of wind during predominantly day-time with increasing ambient temperatures

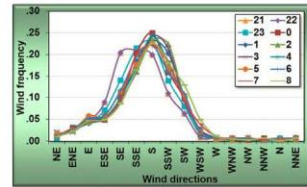


Figure 5. Frequency distribution of wind during predominantly day-time with decreasing ambient temperatures

WIND PATTERNS

Three particular features are clearly visible from the diurnal wind speed cycle shows in Figure 6 below:

- a period of reduced wind speed at night,
- an abrupt increase in the wind speed early in the morning followed by fairly constant wind speeds during the early afternoon and
- a peak in the wind speed during the late afternoon/early evening.

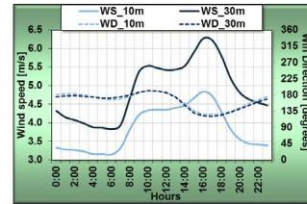


Figure 6. Wind speed and wind direction diurnal cycle

In general terms, this diurnal pattern is consistent with results for other coastal regions, e.g. by Farrugia [3] for Malta and by Rehmana and Al-Abbadib [4, 5] in the Gulf region of Saudi Arabia.

To identify the direction from when the higher wind speed comes from, the wind speed average for each direction was plotted in Figure 7 below. The highest wind speeds are located between the East and South-West direction sectors and the largest difference in wind speed measured at 30m and 10m height was also located in the directions with the highest wind speeds, reflecting the effect of the buildings which tend to reduce the wind speed at 10m a.g.l. but give some degree of

acceleration at 30m a.g.l. (see the location of the obstacles in Figure 2 above).

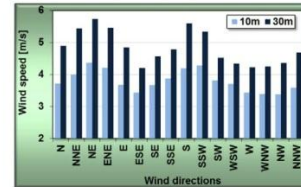


Figure 7 Wind speed averages for each directional sector

This result makes evidence the role of wind shear as a measure of the percentage of increase of the wind with the height, as will be study in the following sections.

The seasonal pattern of the wind speed can be seen in Figure 8 showing that the highest wind speed were registered in March and its minimum in September.

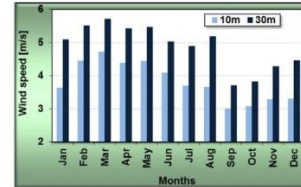


Figure 8 Wind speed averages over the annual cycle

ATMOSPHERIC STABILITY

An important magnitude to evaluate the behaviour of the wind is the stability conditions of the atmosphere. The atmosphere stability can be quantified by means of the Obukhov length (L) [1]. This parameter gives information about the relative magnitudes of vertical air movements produced by mechanically originated vertical turbulence as opposed to thermally generated vertical turbulence. Mechanically generated turbulence is the result of the surface roughness and thermally generated turbulence arises as a consequence of the air density gradients created when the temperature of the air and the sea surface are different. The atmospheric stability can be allocated to one of five stability classes [7], as given in Table 2

TABLE 3. Stability classes in terms of the Obukhov length (L).

Stability class	Obukhov Length L [m]
Very stable	$0 < L < 200$
Stable	$200 < L < 1000$
Near-neutral	$ L > 1000$
Unstable	$-1000 < L < -200$
Very unstable	$-200 < L < 0$

A procedure to compute the Obukhov length L was proposed by Businger [8] and Högström [9] in terms of the Richardson number when measurement of wind speed and temperature are available at both different heights. Figure 9 below presents the diurnal distribution of five stability classes defined in Table 3 for the study site.

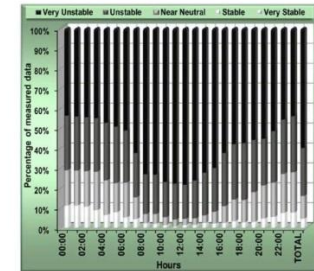


Figure 9. Diurnal distribution of the stability classes

The atmosphere behave more unstable at midday when the higher ambient temperatures are registered while stable states are more frequent at midnight and begin to decrease in the morning when sun rise.

WIND SHEAR AND TEMPERATURE

In order to study the wind shear observed at the mast from the wind speeds measured at the two heights, the empirical power law has been used a presented in Eq. (1) below:

$$u(z) = u(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

where α represents the wind shear exponent which can be calculated, see eq. (2), when the wind speed values at two different heights, $U(z)$ and $U(z_0)$, are available (in the case presented in this paper $z=30m$ and $z_0=10m$):

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{u(z)}{u(z_0)}\right)}{\log\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2)$$

The diurnal pattern of the wind shear along with the ambient temperature averages are shown in Figure 10. As was presented in Figure 3, Figure 4 and figure 5; during the night time (21:00-8:00) the wind comes mainly from the SSE-S with lower wind shear averages, whereas during the morning (9:00-14:00) the main wind from the SSW-WSW gives rise to an increase in the wind shear averages and finally during the afternoon (15:00-20:00) the wind from the NE-SE dominates with the highest wind shear averages. The wind shear observed in these cases results from the combined effect of the main obstacles; see Figure 2, and from the thermal effects over the land and the sea around the measurement site.

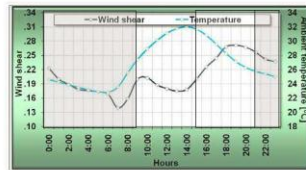


Figure 10. Diurnal pattern over the full study period for the averages of wind shear and ambient temperature

Finally, Figure 11 shows the diurnal pattern for each season of the averages for the ambient temperature and the wind shear. It can be seen that with some degree of dispersion, the spring, summer and autumn patterns describe the same pattern presented above in Figure 10. In the case of the winter season, the distribution of lower temperatures create more stable conditions in the atmosphere which condition a wind shear pattern dominated by diurnal cycles with higher values over the night than over the daylight times.

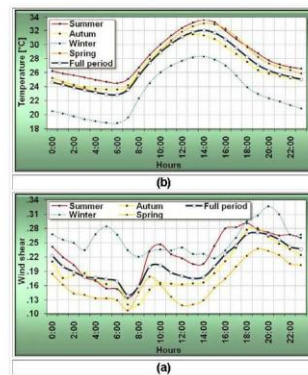


Figure 11 Diurnal pattern for each season for the averages of wind shear (a) and ambient temperature (b)

CONCLUSIONS

Wind speed and wind shear patterns have been studied for a site at the Autonomous University of Yucatán which experiences the tropical conditions of the north Yucatán Peninsula of western México.

Nocturnal wind patterns shown lowest wind speeds blowing from land to sea. In contrast, during daytime, the higher winds coming from over the sea exhibit particular characteristics that reflect the two rather distinct fetches of offshore sea. At sunrise the wind tends to come from the west part of the Gulf of México while towards sunset, the highest wind speeds come from the north-east of the Gulf of México and the east of the Caribbean Sea where sea temperatures are rather different.

An analysis of the rate of change of temperature showed stable conditions during periods of cooling and unstable conditions during periods of heating. In summary, the study illustrates that a complex coastal environment, as provided by the proximity of both the Gulf of México and Caribbean Sea with their different sea conditions, can result in unusual wind characteristics, and in particular, non-standard diurnal wind variations and shear profiles.

ACKNOWLEDGMENTS

Authors would recognise the commitment of the Energy Laboratory team at the Autonomous University of Yucatán who have kept the measurement system in operation throughout the

study period. This work was developed as part as the goals of the research projects "FING-03-009" and "FING-05-016" at the Faculty of Engineering of the Autonomous University of Yucatán.

REFERENCES

- [1] Monin, A.S. and Obukhov, A.M., Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. Tr. Geofiz. Inst. Akad. Nauk SSSR, 1954, 151, 163-187.
- [2] Foken T., 50 Years of the Monin-Obukhov similarity theory, Boundary-Layer Meteorology, 2006, 119, 431-447.
- [3] Farrugia, R.N., The wind shear exponent in a Mediterranean island climate, Renewable Energy, 2003, 28(4), 647-653.
- [4] Rehman, S. and Al-Abbadi, N.M., Wind shear coefficients and their effect on energy production, Energy Conversion and Management, 2005, 46(15-16), 2578-2591.
- [5] Rehmana, S. and Al-Abbadi, N.M., Wind shear coefficients and energy yield for Dhahran, Saudi Arabia, Renewable Energy, 2007, 32, 738-749.
- [6] Kirchhoff, R.H. and Kaminsky, F.C., Wind shear measurements and synoptic weather categories for siting large wind turbines, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 15(1-3), 287-297.
- [7] Van-Wijk A.D.M., Beljaars A.C.M., Holtslag A.A.M. and Turkenburg W.C., Evaluation of stability corrections in wind speed profiles over the North Sea. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1990;33: 551-566.
- [8] Businger JA, Wyngaard JC, Izumi Y, Bradley EF. Flux Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer. Journal of Atmospheric Sciences. 1971;28: 181-189.
- [9] Höglström U. Nondimensional Wind and Temperature Profiles. Boundary Layer Meteorology 1988;42: 55-78.

ANALYSIS OF THE SOLAR AND WIND RESOURCES FOR APPLICATIONS IN HYBRID SYSTEMS IN THE YUCATAN PENINSULA

Rolando Soler-Bientz¹, Lifer Ricalde-Cab^{1,2}, Luis Felipe Barahona Pérez², José Gonzalo Carrillo Baeza²

¹Energy Laboratory, Faculty of Engineering, Autonomous University of Yucatan
Facultad de Ingeniería, Av. Industrias no contaminantes x anillo periférico norte s/n.
CP 97310, Mérida, Yucatán, México.

email: sbientz@uady.mx, sbientz@msn.com
²Renewable Energy Unit, Yucatan Center for Scientific Research (CICY)
Mérida, Yucatán, México.

ABSTRACT

The evaluation of PV-Wind hybrid systems under real field conditions is essential to predict their actual capacity to convert the energy available in the solar radiation and wind resources into electrical power. Therefore, detailed studies of these resources play a crucial role to estimate whether electricity can be generated at a reasonable cost for a specific region. The work presented in this paper shows the results of a study of Solar and Wind resources with the purpose of being applied in conjunction for reliable hybrid PV-Wind generators in the Yucatan Peninsula region. The study was undertaken at the Energy Laboratory of the Autonomous University of Yucatan located close to the north coast. Diurnal and seasonal variations were computed for each resource.

INTRODUCTION

The use of fossil fuels as the world's dominant energy source is one of the key factors driving global climate change. Thus, cleaner sources of energy should be considered. Among the most environmental friendly energy sources available at present are the wind and solar energies. In order to provide reliable electricity at reasonable costs at a specific geographical region, a suitable wind and solar resource is required. In this regard, detailed studies of regional resources are crucial to accurately assess the solar and wind energy potential.

The development of PV-Wind generators for particular locations is highly correlated with the resources availability, their cycling patterns and the reliability of measurement systems used to evaluate these resources [1][2]. Previous solar radiation and wind resource studies have been made in the Yucatan Peninsula [3][4] to support the study of the PV systems and wind generation as independent generation systems. The work presented in this paper shows the results of a study of the solar and wind resources with the purpose of being applied in conjunction for hybrid PV-Wind generators in the Yucatan Peninsula region. The study was undertaken at the Energy Laboratory of the Autonomous University of Yucatan.

Considering the fairly flat geographical conditions of the Yucatan Peninsula, the results obtained could be extrapolated to describe the patterns over the majority of the Peninsula. The presented research establishes important results which can contribute to develop optimization strategies with the corresponding economic impact in the development of Hybrid PV-Wind generators in the Yucatan Peninsula [5].

MONITORING SYSTEM

The measurement site for this study is located at the eastern of Mexico in the State of Yucatan on the North coast of the Yucatan Peninsula. Therefore, the climate patterns should be strongly influenced by the proximity of the Gulf of Mexico. Figure 1 shows a map indicating the location of the measurement site. Specifically, the meteorological tower is sited within the Science and Engineering Campus of the Autonomous University of Yucatan.



Figure 1. Geographical location of the Yucatan State at the Eastern of Mexico

The data collection system used in this research comprises a solar tracker system, solar radiation sensors, a wind and direction sensors, a data logger and a computer. The data logger collects pre-processes and stores the data measured from the sensors every two seconds then compute the averages every one minute. Every 24 hours a bespoke computer program downloads and stores the data in a preconfigured database on a computer which acts as local measurement server.

Figure 2 shows a close view of the wind sensors installed on a boom which was attached to a mast at 30m height above the ground level (a.g.l.). The relevant technical parameters for the operation of the wind sensors have been also listed in this figure.



Technical specifications	Sensors	
	Anemometer RM Young 3101	Wind Vane RM Young 3101
Measurement range	0 to 50 m/s	0° to 360°
Starting threshold	0.5 m/s	0.8 m/s
Distance constant	2.3 m	N/A
Operating temperature range	-50 to 50°C	-50 to 50°C
System error	1 %	± 5°
Recording resolution	0.01 m/s	0.1°

Figure 2. Technical specifications of the wind speed (Anemometer) and wind direction (wind vane) installed on a boom in the measurement tower



Parameters	Values
Accuracy	< 0.10°
Repeatability	< 0.05°
Resolution	< 0.036°
Velocity	up to 2.50°/sec
Acceleration	up to 9°/sec ²
Rotation	540° azimuth: 90° / 320° zenith

Figure 3. Solar tracker and its main operational properties

A picture of the solar tracker system with all the solar radiation sensors installed can be seen above in Figure 3 as well as the main operational properties of the solar tracker.

The main characteristics of the pyranometer and pyrhemometer installed on the solar tracker are presented in table 1. The solar sensors include a shadow system to measure the diffuse radiation and a support tracking arm to aim the pyrhemometer toward the sun position allowing monitoring the direct radiation on the study site. The pyranometers were mounting on the horizontal surface of the track system, see Figure 3 above.

Table 1. Main technical specification for the solar radiation sensors

Parameters	Pyrrhemometer	Pyranometer
Spectral range	200 - 4000 nm	305 - 2800 nm
Sensitivity (nominal)	0.011	4-6 mV/W/m ²
Response time (1/e)	2 sec	12 sec
Full opening view angle	5° ± 0.2°	N / A

The dataset created with the whole data monitored from the sensors was filtered to eliminate records not related with the physical magnitudes under study. Then, statistical methods were applied in order to derive hourly averages to study the diurnal and seasonal variations for each resource. The study period was over a year and a half since October 2008.

RESULTS

Wind Patterns

Diurnal cycles classified by months have been plotted for the wind speed, Figure 4 and Figure 5; and for the wind direction, Figure 6 and Figure 7.

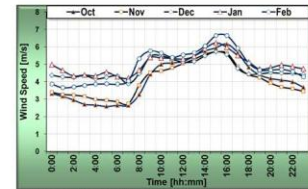


Figure 4. Wind speed diurnal cycle for the months from October to February

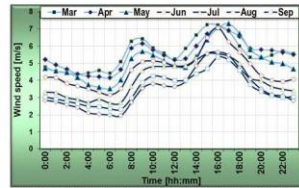


Figure 6. Wind speed diurnal cycle for the months from March to September

The patterns were divided in two groups: from October to February and from March to September considering the similarities of the wind behavior during these two periods and in order to simplify their identification within the plots.

The wind speed presents a clear double peak pattern over the daylight times along the whole year. In the case shown in Figure 4 for the months between October to February (autumn and winter seasons) this double peak is generally less pronounced than for spring and summer months, see Figure 5.

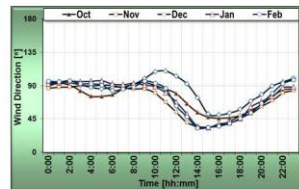


Figure 6. Wind direction diurnal cycle for the months from October to February

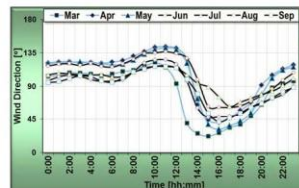


Figure 7. Wind speed diurnal cycle for the months from March to September

The wind directions also have shown greater variations over the spring and summer, Figure 7, than during autumn and winter, Figure 6. This behavior is produced by the effects of the sea and land breezes which have a clear effect on the study site considering its distance to the shores of around 25km at just 7m above the mean sea level and the almost flat conditions of the majority of the surface in the Yucatan peninsula.

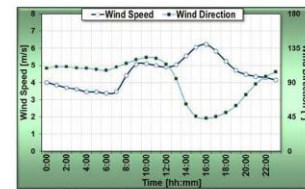


Figure 8. Wind speed and Wind direction diurnal cycle for the whole study period

Figure 8 above show the wind speed and direction profiles integrating the data measured over the whole study period. As can be seen, the changes in the wind direction during the afternoon and early evening are driven by the higher wind coming from the sea (sea breeze) around the East direction.

Seasonal patterns of wind speed and wind direction during the whole study period are shown in figure 9. It can be appreciated that the wind comes as average from the East direction reaching the maximum averages around April and March; and minimum around August and September.

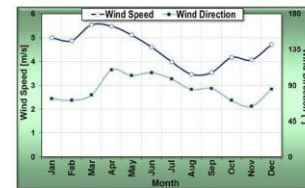


Figure 9. Wind speed and Wind direction seasonal cycle for the whole study period

Solar Radiation Patterns

Hourly averages of solar radiation over the whole study period considering the global, direct and diffuse

components have been plotted in Figure 10 below. The diffuse solar radiation was directly measured as reference using a shadow device that was attached to the solar tracker, as was shown in figure 2 above.

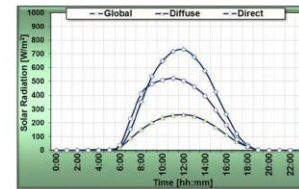


Figure 10. Hourly averages of the solar radiation over the diurnal cycle for the whole study period

The direct component of the global solar radiation plays a crucial role for PV concentrator and solar thermal applications. Thus, both the global and the direct components were also statistically classified in their diurnal patterns for each month.

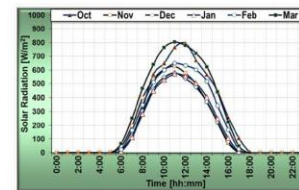


Figure 11. Diurnal patterns of the solar radiation for each month from October to March: (a) Direct Solar radiation and (b) Global solar radiation

As in the case of the wind patterns, the solar radiation was classified in the months from October to March and from April to September in order to make easy the identification of each month's particular pattern within each figure. Pattern from April to September are shown below in Figure 12.

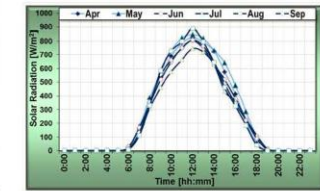


Figure 12. Diurnal patterns of the solar radiation for each month from April to September: (a) Direct Solar radiation and (b) Global solar radiation

THE SOLAR-WIND DISTRIBUTION

Finally, diurnal cycles comprising the whole study period for wind speed and solar radiation have been plotted together in Figure 13 in order to compare the availability of these resources for potential hybrid systems.

It can be appreciated that peaks in the wind speed intensity are reached around the times when usually the higher demand of electricity are requested from the electric grid. This could suggest that the wind energy can make a very useful contribution to face the diurnal rise in the energy demand avoiding the requirement of storage systems which usually diminish the total efficiency of the system and increase the overall system costs.

It should be also noted that the peak of the solar radiation, in particular for the direct but also for the global, coincide with the decrease in wind speed during the late morning. On the other hand in the early afternoon, the decrease of the solar radiation occur when the wind speeds are reinforce with the contribution from the east of the sea breeze which last the rest of the afternoon up to early evening, see Figure 13 and Figure 8.

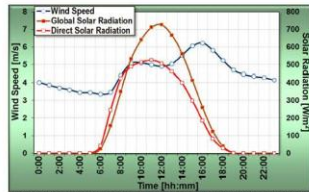


Figure 13. Hourly averages of the solar radiation over the diurnal cycle for the whole study period

In the case of the seasonal patterns, Figure 14 below shows that the decrease of the monthly averages of wind speeds on May occur simultaneously with the maximum in the availability of global solar radiation. Similarly, the minimum of the monthly wind speed averages was reached around August and September when the solar global radiation registered a secondary maximum over the annual pattern.

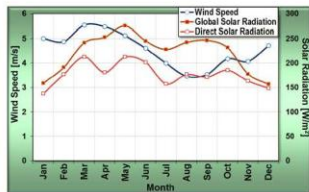


Figure 14. Monthly averages of the solar radiation over the seasonal cycle

CONCLUSIONS

Diurnal behaviours of the global and direct components of the solar radiation during a year and a half were identified and their contribution was analysed in relation with the wind patterns available at 30m height above the ground level.

The results demonstrate that the availability of solar energy and wind energy compensates each other along the daylight times and along the seasons during the whole year. It was also found that the double peak described by the wind speeds over the diurnal cycle makes available electricity from the wind energy at times when the higher demand of energy from the electric grid are required.

It could be concluded that the inland areas at the north of the Yucatan Peninsula have a useful wind potential for low power systems which can compensates the operation of PV systems to provide higher energy reliability for renewable energy generators.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to recognise the commitment of the Energy Laboratory team at the Autonomous University of Yucatan who have maintained the measurement system throughout the study period. This work was developed as part of the research project "FING-05-016" at the Faculty of Engineering of the Autonomous University of Yucatan.

REFERENCES

- [1]. G. Vijayakumar, et. al. "Analysis of short-term solar radiation data". *Solar Energy*, 2005, Vol. 79:5, pp 495-504.
- [2]. C. Tiba and N. Fraidenraich. "Analysis of monthly time series of solar radiation and sunshine hours in tropical climates". *Renewable Energy*, 2004, Vol. 29:7, pp 1147-1160.
- [3]. Soler-Bientz, R. and L.O. Ricalde-Cab. Solar radiation in Yucatan Peninsula, preliminary analysis. in *PVSC: 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2010, Waikiki, Hawaii, USA: IEEE. DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614397.
- [4]. Soler-Bientz, R. and L. Ricalde-Cab. Preliminary results of a measurement station to characterize the wind energy potential at the eastern of México. in *ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability (ES2010)*, 2010, Phoenix, Arizona USA: ASME. DOI: 10.1115/ES2010-90216.
- [5]. Soler-Bientz, R., L.O. Ricalde-Cab. and A.C. Ricalde-Cab. Autonomous PV system to applications in the eastern of Mexico. in *PVSC: 2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Vols 1-4, 2008, San Diego, CA, USA: IEEE. DOI: 10.1109/PVSC.2008.4922842.

