



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA

**Generación Eoloeléctrica con Almacenamiento de
Hidrógeno**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

P R E S E N T A:

Amilcar Fuentes Toledo

Director de tesis: **Dr. Oscar A. Jaramillo Salgado**



2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Jesús Antonio Del Río Portilla

Secretario: Dr. Oscar Alfredo Jaramillo Salgado

Vocal: Dr. Arturo Fernández Madrigal

1^{er}. Suplente: Dr. Ulises Cano Castillo

2^{do}. Suplente: Dr. José Rubén Dorantes Rodríguez

Lugar donde se realizó la tesis:

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA, TEMIXCO MORELOS.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Oscar A. Jaramillo Salgado

FIRMA

*A mi padre, mi madre y mis hermanas, por su cariño y comprensión,
por su apoyo incondicional, sin el cual,
simplemente, hoy no estaría aquí...
...que a pesar de la distancia
siempre los llevo conmigo.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco...

Al Dr. Oscar A. Jaramillo Salgado por su amistad, apoyo y guía en la realización de esta tesis, sin lo cual ésta no podría haberse llevado a cabo.

A los miembros de mi comité tutorial: Dr. Jesús Antonio Del Río Portilla, Dr. Arturo Fernández Madrigal, Dr. Ulises Cano Castillo y Dr. José Rubén Dorantes Rodríguez. Por sus comentarios y observaciones, las cuales, sin duda, contribuyeron significativamente en la mejora de este trabajo.

Al M.I. Carlos Alberto Pérez Rábago y al Ing. José de Jesús Quiñones Aguilar por su valiosa colaboración en la en colecta y procesamiento de la información anemométrica.

Al Centro de Investigación en Energía de la UNAM por haberme permitido realizar mis estudios de maestría y contribuir a mi desarrollo personal y profesional.

Al CONACyT y al proyecto PAPIIT N°. IN106207-3 por el apoyo económico durante mi estancia en la maestría.

Al fondo para el medio ambiente mundial y al programa de las naciones unidas para el desarrollo por el apoyo para la obtención de información anemométrica facilitada por Instituto de Investigaciones Eléctricas de México

Al Personal académico y compañeros del CIE, por su apoyo y por su amistad. Principalmente a toda la banda del fut, en especial a Carlos, Fabrizio, Luis, Miguel, David, Ulises LI., Ulises D., Alex, Víctor, Beatriz y Diane. Por ser mucho más que compañeros de escuela. Gracias muchachos

Y de forma muy especial...

A Erika por tu apoyo y cariño, por animarme a seguir adelante y compartir conmigo tantos buenos momentos, gracias cielo.

Contenido

INTRODUCCIÓN	6
1 ANTECEDENTES	8
2 EL VIENTO	18
2.1 MECANISMOS DEL MOVIMIENTO DEL VIENTO	18
2.2 PERFIL VERTICAL DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO	21
2.2.1 PERFIL LOGARÍTMICO	21
2.2.2 PERFIL DE LEY DE POTENCIA.	22
2.2.3 VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE CON RESPECTO A LA ALTURA	23
2.3 POTENCIA DEL VIENTO	24
2.3.1 LIMITE DE BETZ	25
2.4 TOMA DE DATOS DE LA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO	25
2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO	27
2.5.1 DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL	27
2.5.2 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE RAYLEIGH.	28
2.5.3 OTRAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN	28
2.6 ENERGÍA EOLOELÉCTRICA	32
2.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	33
3 HIDRÓGENO Y CELDAS DE COMBUSTIBLE.	39
3.1 PRODUCCIÓN HIDRÓGENO	40
3.2 CELDAS DE COMBUSTIBLE	40
3.2.1 FUNDAMENTOS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.	40
3.2.2 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSIBLE.	41
3.2.3 VENTAJAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLES	43
3.3 ELECTROLIZADORES	44
4 SISTEMA HÍBRIDO	47
4.1 PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA	47
4.2 GENERADOR EOLOELÉCTRICO	48
4.3 SISTEMA DE CONTROL	50
4.4 ELECTROLIZADOR	50
4.5 CELDA DE COMBUSTIBLE	52
4.6 CARGA	54
4.7 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	54
5 COSTO NIVELADO DE PRODUCCIÓN	63

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

REFERENCIAS

Lista de Figuras

1.1	La producción de crudo en los EEUU alcanzó su máximo en 1970, siguiendo las predicciones de varias investigaciones. Cuando la producción mundial alcance su pico máximo se habrá acabado para siempre el petróleo de bajo costo.	9
1.2	Emisiones de CO2 en millones de toneladas (IEA, 2004).	9
1.3	Aumento de la temperatura en el mundo de 1880 a 2000 (IEA, 2004).	10
1.4	Estimación eólica en México.	11
1.5	Artículo publicado en la Scientific American sobre el generador de Brush	11
1.6	El aerogenerador de Gedser (DWIA, 2007).	12
1.7	Comparación de costo de capital para opciones de almacenamiento de 941 kg de hidrógeno (Tomado de Kottenstette et al. 2004)	14
1.8	Resultados de la investigación de Afgan sobre la generación de hidrógeno por varios métodos (Tomado de Afgan et al. 2004).	16
1.9	Resultados de Koroneos de las Emisiones de SO4 y CO2 equivalentes en la producción de hidrógeno por diferentes medios (tomado de Koroneos, 2004).	16
2.1	Gradiente de presión horizontal.	19
2.2	Generación de viento geostrófico por el balance de fuerzas de F_{PX} y F_C	20
2.3	Viento gradiente en el hemisferio norte.	20
2.4	Efecto Brisa Marina-Brisa Terral en la costa.	21
2.5	Viento valle montaña.	22
2.6	Flujo de aire a través de un cilindro, simula el flujo de aire a través del rotor(Adaptado de Manwell,2002).	26
2.7	Distribución de Weibull con parámetro de escala $c=10$ y parámetros de forma $k= 2$ y 3 (tomado de Petal,1999)	28
2.8	Distribución de Rayleigh con parámetros de escala c de 8 a 16 mph (tomado de Patel, 1999).	29
2.9	Distribución Bimodal con valores de $c_1=3.2$, $c_2=13.7$ y $k_1= 1.7$, $k_2=3.9$ y $p = 0.29$	30
2.10	Distribución de Gumbel para $\mu = 0$, $c = 1$ y $\mu = 1$, $c = 2$, (Adaptado de McLaughlin, 1999)	31
2.11	Distribución de frechet para $c = 1$ y $k = 10$ (tomado de kutz,1999)	32
2.12	Datos de velocidad del viento en la localidad de La Venta Oax. a una altura de 32 m.	34
2.13	Función de distribución de Weibull para velocidades de viento a una altura de 10 m. en El cardón BCS.	34
2.14	Función de distribución de Weibull para velocidades de viento a una altura de 50 m. en El Cardón BCS.	35
2.15	Función de distribución de Weibull para velocidades de viento a una altura de 10m en Chetumal Q. Roo.	35

2.16	Función de distribución de Weibull para velocidades de viento a una altura de 50 m. en Chetumal Q. Roo	36
2.17	Función de distribución de Weibull & Weibull para velocidades de viento a una altura de 15 m. en La Venta Oax	37
2.18	Función de distribución de Weibull & Weibull para velocidades de viento a una altura de 32 m. en La Venta Oax.	38
3.1	Esquema básico de una celda de combustible. (Adaptado de EG and G Technical Services, Inc., 2004)	41
3.2	Reacción en los electrodos y flujo de carga para una celda de combustible de electrolito ácido. (Tomado de Larminie y Dicks, 2003).	42
3.3	Diagrama simplificado de la electrólisis del agua (Adaptado de www.wikipedia.org) .	45
3.4	Reacciones en un electrolizador (adaptado de Sandoval,2006).	45
4.1	Diagrama general del sistema híbrido en simulink.	48
4.2	Regresión polinómica de la curva de potencia de un generador eoloelectrico de 2500 W con regulación stall.	49
4.3	Bloque del generador eoloelectrico (con entradas y salidas) en simulink.	49
4.4	Sistema de control. Determina si existe superavit o déficit de la producción del aerogenerador con respecto a la carga.	51
4.5	Representación del electrolizador en la simulación.	52
4.6	Diagrama de la celda de combustible en Simulink.	53
4.7	Curva de consumo a satisfacer (Adaptado de Ramos y Fiscal, 1999).	54
4.8	Sobredimensionamiento del sistema híbrido para La Venta Oax.	56
4.9	Subdimensionamiento del sistema híbrido para La Venta Oax.	57
4.10	Resultado de la simulación para La Venta Oaxaca.	59
4.11	Resultado de la simulación para El Cardón BCS.	60
4.12	Resultado de la simulación para Chetumal Q. Roo.	61
5.1	Datos calculados y modelo para el cálculo del CNP como función del Factor de Planta.	66
5.2	Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para La Venta Oax tomando una tasa de interés del 10% y variando el costo del sistema de hidrógeno.	67
5.3	Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para La Venta Oax tomando una tasa de interés del 10% y variando el costo del aerogenerador.	67
5.4	Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para El Cardón BCS. tomando una tasa de interés del 10% y variando el costo del sistema de hidrógeno.	68
5.5	Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para El Cardón BCS. tomando una tasa de interés del 10% y variando el costo del aerogenerador.	68
5.6	Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para Chetumal Q. Roo tomando una tasa de interés del 10 % y variando el costo del sistema de hidrógeno.	69
5.7	Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para Chetumal Q. Roo tomando una tasa de interés del 10% y variando el costo del aerogenerador	69

Lista de Tablas

1.1	Resultado de Dutton del efecto del sobredimensionamiento de una turbina en un sistema con almacenaje de energía. Datos Velocidad media del viento = 8 m/s; potencia generador eólico = 15 kW; potencia del electrolizador= 10kW periodo = 1 año	13
1.2	Autos alimentados por hidrógeno y mitigación de CO2 calculado por Gonzáles (adaptado de Gonzáles et al. 2004)	15
2.1	Algunos valores de la rugosidad de la superficie y del índice de la ley de potencia para diferentes tipos de terrenos.	23
2.2	Densidad de potencia según la velocidad del viento	25
2.3	Principales características del recurso eólico en las localidades de El Cardón y Chetumal	36
2.4	Principales características del recurso eólico en la localidad de La Venta	37
3.1	Reacción electroquímica en las celdas de combustible. Adaptado de EG and G Technical Services, Inc., 2004.	43
4.1	Factor de planta anual del aerogenerador por localidad	58
4.2	Capacidad óptima de los elementos del sistema híbrido para La Venta Oax.	58
4.3	Capacidad óptima de los elementos del sistema híbrido para El Cardón BCS.	58
4.4	Capacidad óptima de los elementos del sistema híbrido para Chetumal Q. Roo.	62
4.5	Generación y uso de hidrógeno en el sistema híbrido	62
5.1	Costos de inversión por tecnología	64
5.2	Costos Nivelados y Factor de Planta de los estudios de caso.	64
5.3	Relación entre el inverso del Fp y el CNP	65
5.4	Potencia nominal del aerogenerador calculada y encontrada en la simulación	71
5.5	Costos Nivelado y Factor de Planta de los estudios de caso.	72

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de esta investigación es la evaluación de un sistema de energía híbrido en tres localidades diferentes de la Republica Mexicana. El sistema híbrido, conformado por un aerogenerador y un sistema de celda de combustible, debe ser capaz de satisfacer de manera autónoma e ininterrumpida una carga eléctrica que no está interconectada a la red.

La principal problemática en el uso de sistemas híbridos aerogenerador-celda de combustible es lograr un buen control del funcionamiento general del sistema y realizar un correcto dimensionamiento de los diversos componentes con la finalidad de garantizar en todo momento la entrega de energía que demanda la carga.

En este trabajo nos enfocamos al estudio de un sistema de energía híbrido formado por un generador eoloeléctrico, un electrolizador, un sistema de almacenamiento de hidrógeno y un sistema de celda de combustible. Se establecen los parámetros de funcionamiento del sistema, las características de cada uno de los principales componentes del sistema, la estimación del funcionamiento del sistema híbrido bajo diferentes escenarios y se estima el costo nivelado de producción de electricidad bajo condiciones de demanda eléctrica específica. Para ello se establece un método para determinar la potencia nominal de los diversos integrantes del sistema con la finalidad de determinar la configuración óptima del sistema para satisfacer dicha carga eléctrica. El análisis del sistema híbrido se realiza a través del programa de computo Simulink de MATLAB ya que permite organizar los diferentes componentes del sistema híbrido en subsistemas individuales y su posterior integración. Igualmente se presenta el estudio del costo nivelado de producción de energía eléctrica del sistema híbrido para cada uno de las localidades en que éste fue evaluado.

Esta tesis está organizada de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se puede encontrar la revisión bibliografica del estado del arte referente a los sistemas de energía híbridos eólicos haciendo énfasis en los sistemas conformados por un aerogenerador y un sistema de celda de combustible.

En el capítulo 2 se describen las principales características que rigen la generación, comportamiento y análisis del recurso eólico. Con base en el análisis estadístico de la velocidad del viento se evaluó el recurso eólico de tres localidades propuestas para la implementación del sistema híbrido. Se determinaron las funciones de distribución que más se adecuan al comportamiento de la velocidad del viento en dichas localidades, se reportan los parámetros de forma k y velocidad c de las funciones de distribución y algunos parámetros estadísticos tales como la velocidad media del viento y la desviación estandar de los datos anemométricos. El análisis de los datos anemométricos permite determinar cual localidad cuenta con el mejor recurso eólico.

En el capítulo 3 se realizó una breve descripción de las celdas de combustible y los electrolizadores, así como los tipos que existen de estos dos dispositivos. Se presentan las reacciones químicas que se llevan a cabo en las celdas de combustible y en los electrolizadores dependiendo principalmente

del electrolito que utilizan. Se muestran los modelos que son implementados en la simulación del electrolizador y de la celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM), así como sus costos asociados.

En el capítulo 4 se presenta cada uno de los elementos del sistema híbrido por separado y su integración para su modelación mediante Simulink. En este capítulo se determinaron las ecuaciones que rigen el comportamiento de los diversos elementos del sistema, los parámetros generales de operación incluyendo el sistema de control cuando el sistema opera en superávit o bien en déficit del recurso eólico disponible. Se desarrolló una metodología con base en el factor de planta del aerogenerador que permite determinar la potencia instalada mínima necesaria y optimizar el comportamiento del sistema híbrido. Además, se presentan los resultados de la simulación de cada uno de los elementos del sistema y del sistema completo y se muestra para cada estudio de caso la configuración óptima del mismo. Para cada localidad se determinó el período del año en el cual el sistema debe iniciar su operación como sistema autónomo y de manera ininterrumpida.

En el capítulo 5 se determina el Costo Nivelado de Producción de energía de las configuraciones del sistema híbrido más adecuadas para cada una de las localidades en las cuales se evaluó la operación del sistema híbrido.

Al final del trabajo se recopilan las conclusiones más relevantes de nuestra investigación. Se establece una relación entre el Costo Nivelado de Producción de electricidad y el factor de planta. Se muestra que el sistema híbrido más pequeño corresponde a la zona Oaxaca cuyo factor de planta es el mayor de los estudios de caso, lo que muestra que entre mayor sea el factor de planta del aerogenerador menor será el costo nivelado de producción del sistema. También se describe la metodología para encontrar la potencia del aerogenerador que resulta adecuada para satisfacer la carga eléctrica en función del recurso eólico disponible. Así mismo, se muestran los puntos de mejora y se indican los posibles trabajos futuros de esta investigación.

Capítulo 1

ANTECEDENTES

Actualmente, varias investigaciones indican que la era de la de los combustibles derivados del petróleo llegará a su fin en un periodo no mayor que cincuenta años, inclusive se menciona que el pico máximo de extracción de petróleo en al ámbito mundial ocurrirá antes de que concluya el 2010 como se muestra en la figura 1.1 (Courtesy et al., 1998).

Se debe considerar que los combustibles fósiles además de su finitud tienen el serio problema de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producidos por su combustión. El 75% del incremento en la concentración de GEI se debe a los combustibles fósiles. En la figura 1.2 se muestra la evolución de las emisiones mundiales de CO₂ de 1971 a 2002, en millones de toneladas. También se debe considerar el cambio climático ocasionado por la acumulación de los GEI. Como se indica en la figura 1.3, en los últimos 10 años se han presentado los días más caluroso desde 1866. Cabe señalar que las pérdidas económicas de 1990 por desastres naturales climáticos establecieron un nuevo récord, alcanzando los 92,000 millones de dólares, más que en toda la década de los años ochenta.

Por lo antedicho, se vuelve urgente la investigación y el desarrollo de las fuentes renovables de energía (FRE), con la finalidad de tener una diversificación y transición energética que conduzca a un desarrollo sustentable. Así, se busca que las tecnologías que utilizan las FRE nos permitan llevar a cabo las actividades cotidianas sin el uso de combustibles fósiles y por tanto se cuente con un menor impacto ambiental.

En México, para satisfacer las necesidades de cocción de alimentos, iluminación, calefacción, calentamiento de agua, usos comerciales y servicio público, entre otras, se utiliza gas licuado de petróleo, el cual participó con 40.5% del consumo total, leña con el 29.6%, electricidad con el 24.7%, gas natural con el 4.6%, diesel y querosenos en conjunto con 0.6%. En la industria el consumo energético fue de 1,237.4 PJ en el 2004, cifra superior en 8.4% a los 1,141.955 PJ de 2003. De este total, 32.4% correspondió al gas natural, 27.8% a la electricidad, 11.1% al combustóleo, 7.2% al bagazo de caña, 8.8% al coque de petróleo, 5.5% al coque de carbón, 3.8% al diesel, 3.0% al gas licuado, 0.4% al carbón y la participación de los querosenos fue poco significativa. Para satisfacer tales demandas energéticas se pueden considerar las FRE como sistemas fototérmicos, los fotovoltaicos, la energía hidráulica a pequeña y gran escala, la energía eólica, entre otras. Por ejemplo, el potencial de aprovechamiento de energía solar en México es uno de los más altos del mundo. Alrededor de tres cuartas partes del territorio nacional son zonas con una insolación media del orden de los 5 kWh/m² al día, el doble del promedio en EUA. Además, se cuenta con un importante potencial eólico dentro del territorio nacional que puede ser aprovechado para la generación de electricidad o aplicaciones específicas como bombeo de agua. En la figura 1.4 se muestra un estimado de la energía eólica aprovechable en México, cuyo potencial es mayor que 15,000 MW de capacidad instalada. En dicha figura se muestran las

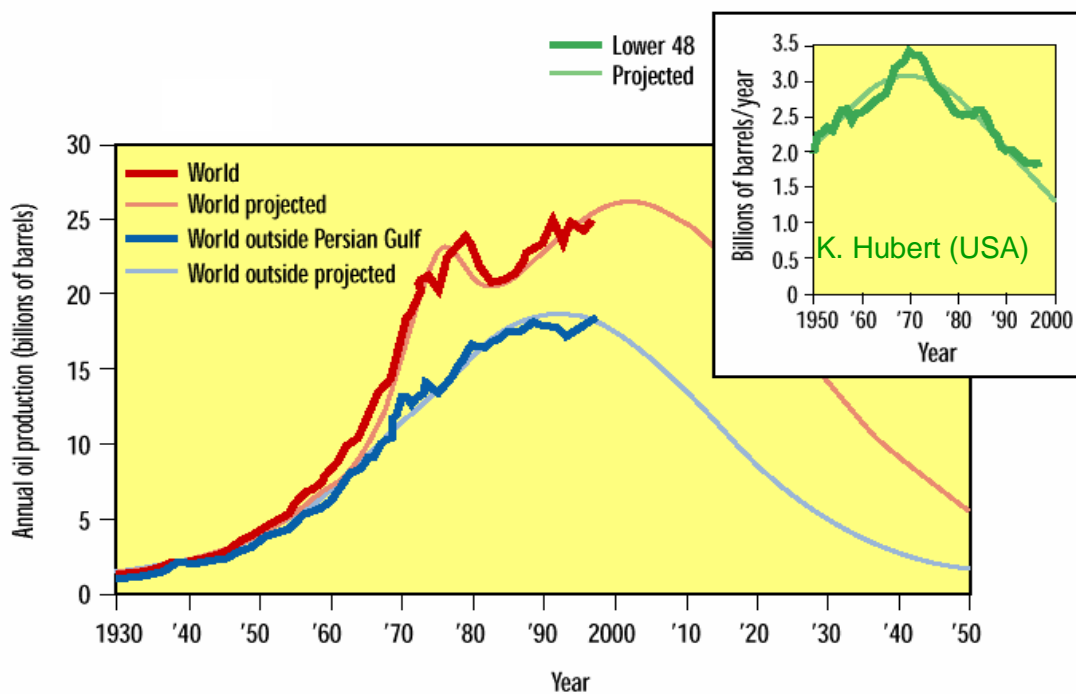


Figura 1.1: La producción de crudo en los EEUU alcanzó su máximo en 1970, siguiendo las predicciones de varias investigaciones. Cuando la producción mundial alcance su pico máximo se habrá acabado para siempre el petróleo de bajo costo.

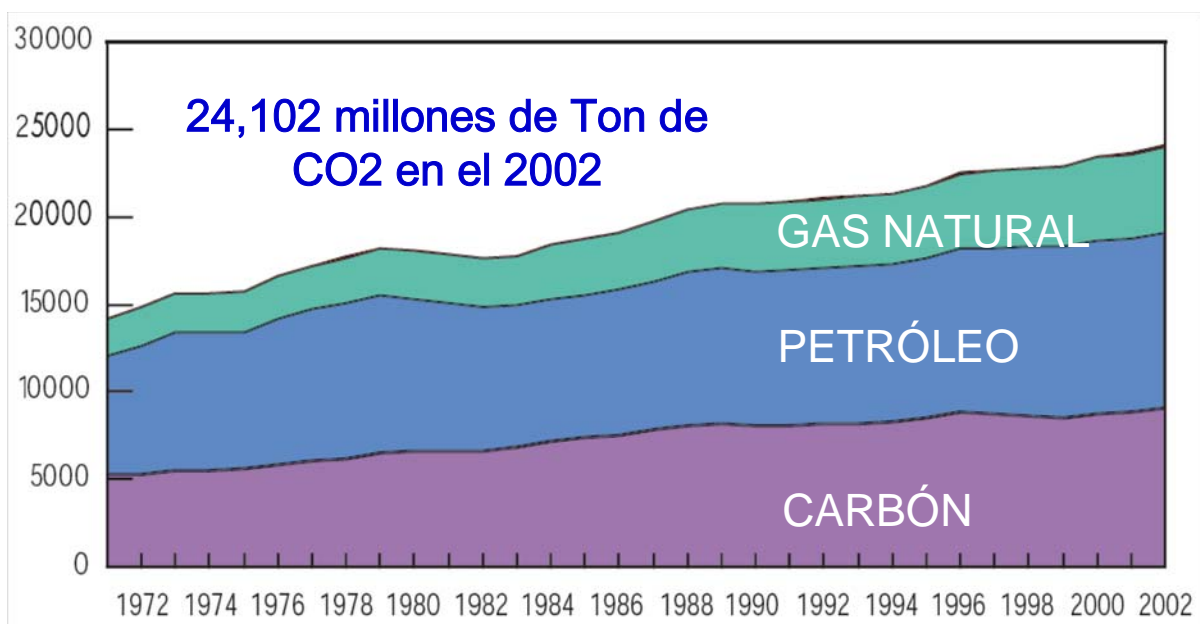


Figura 1.2: Emisiones de CO2 en millones de toneladas (IEA, 2004).

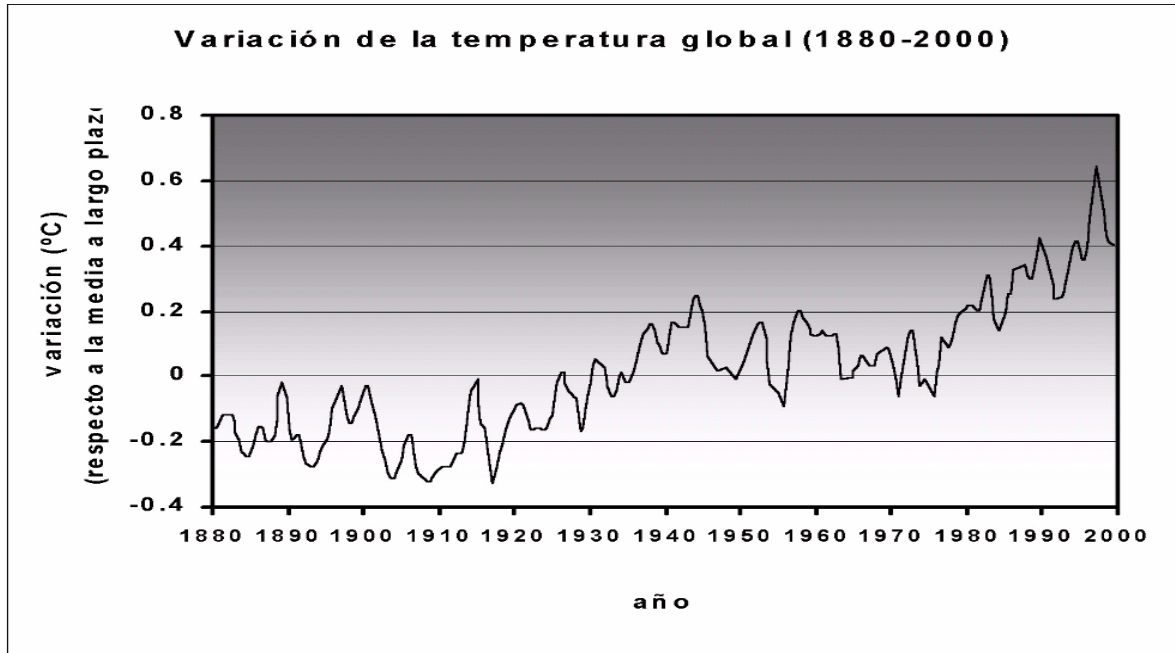


Figura 1.3: Aumento de la temperatura en el mundo de 1880 a 2000 (IEA, 2004).

zonas del país en las que se han llevado a cabo mediciones anemométricas y se incluye su potencial de desarrollo. Además, puede observarse que las zonas más importantes corresponden a la zona del Istmo de Tehuantepec, Península de Yucatan y Baja California, altiplano central, y costa norte del Golfo de México. En México existe alta potencialidad para el aprovechamiento de la energía eólica en la producción de electricidad sin embargo, las actuales políticas gubernamentales y algunos otros factores han sido de detractores de esta tecnología.

La energía eólica ha sido aprovechada desde hace siglos por el hombre en diversas actividades productivas tal como el bombeo de agua, molido de granos y desde hace un par de siglos en la generación de electricidad mediante generadores eolieléctricos, también conocidos como aerogeneradores.

Para aprovechar la energía contenida en el viento y convertirla en energía eléctrica, Brush en el año 1887 construyó la primera turbina eólica de funcionamiento automático para generación de electricidad. La turbina era de grandes dimensiones, contaba con diámetro rotor de 17 m y 144 aspas fabricadas en madera, el generador era de sólo 12 kW, era de giro lento debido al alto número de aspas y no era muy eficiente. El generador eolieléctrico de Brush fue célebre por su sistema de control eléctrico totalmente automatizado. Su principio de operación, mediante la utilización de solenoides, no cambió mucho con las generaciones siguientes de generadores eólicos hasta 1980 aproximadamente, cuando los controladores de los aerogeneradores son equipados con computadoras.

Otro de los grandes pioneros de los generadores eólicos fue el ingeniero Poul La Cour que en 1892 construyó su primer prototipo de generador eolieléctrico, así como un túnel de viento para realizar sus experimentos. Lo anterior sentó las bases de los aerogeneradores modernos debido a que en sus experimentos descubrió que en los grandes generadores eolieléctricos de giro rápido con pocas palas en el rotor son más eficientes para la producción de electricidad que aquéllos de giro lento. La Cour se preocupaba del almacenamiento de energía y utilizaba la electricidad de sus turbinas eólicas para producir electrólisis y obtener así hidrógeno para las lámparas de gas de su escuela, por lo que se

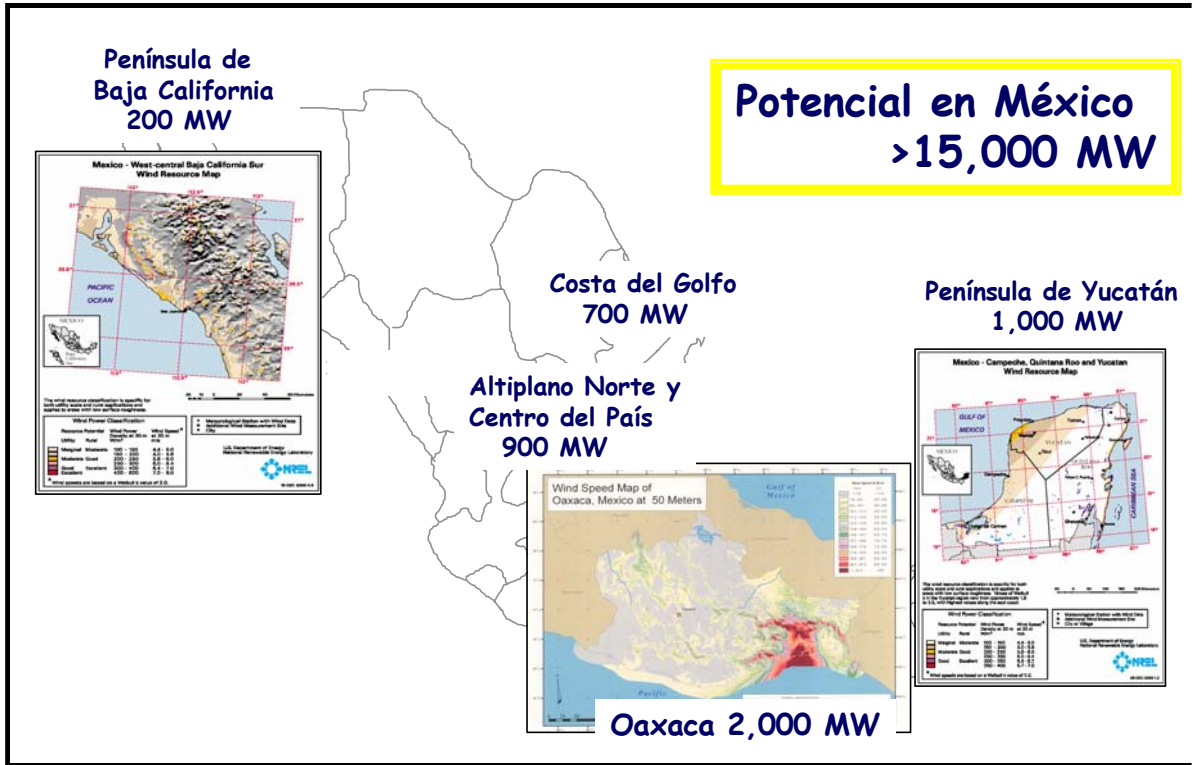


Figura 1.4: Estimación eólica en México.

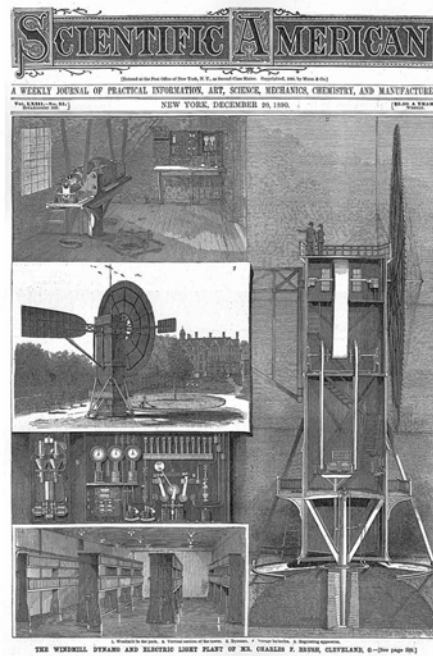


Figura 1.5: Artículo publicado en la Scientific American sobre el generador de Brush

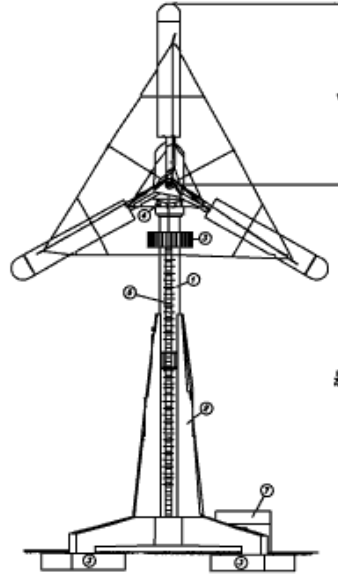


Figura 1.6: El aerogenerador de Gedser (DWIA, 2007).

puede considerar como precursor de la generación de hidrogeno mediante la energía eólica.

Los primeros aerogeneradores de corriente alterna surgieron de la mano de Johannes Juul. En 1956 desarrolló el aerogenerador de Gedser (Dinamarca) de 200 kW . El generador eoloeléctrico era tripala con rotor a barlovento, con orientación electromecánica y un generador asíncrono. Su diseño fue pionero de los modernos aerogeneradores, contaba con regulación por pérdida aerodinámica, así como la innovación de frenos aerodinámicos de emergencia en punta de pala, que se sueltan por la fuerza centrífuga en caso de sobrevelocidad, mismo sistema que se utiliza en las modernas turbinas de regulación por pérdida aerodinámica.

Después de la crisis petrolera de la década de 1970, en la que se presentó un aumento de los precios de los combustibles fósiles, se originó un auge en las energías renovable y la eólica no fue la excepción. La generación de aerogeneradores de 55 kW que fueron desarrollados entre 1980 y 1981 supuso la ruptura industrial y tecnológica para los modernos aerogeneradores. La industria eólica se modernizó, el auge además fue alentado por políticas de gobierno que promovían el uso de las fuentes de energía renovables, instalándose por ejemplo miles de generadores eólicos en Palm Springs California, Estados Unidos.

Los aerogeneradores convierten la energía cinética del viento para producir un trabajo mecánico que posteriormente se transforma en energía eléctrica. Los aerogeneradores son algo inusuales, si se les compara con otros equipos generadores que suelen encontrarse conectados a la red eléctrica tales como generadores hidroeléctricos o generadores acoplados a turbinas ya sea de gas o vapor. Ya que los aerogeneradores dependen de la velocidad del viento para generar potencia eléctrica, se les ha considerado por mucho tiempo una fuente intermitente no despachable debido al carácter aleatorio de las condiciones del viento. Cabe precisar que no obstante lo cambios aleatorios de la velocidad del viento, los sitios o locaciones que cuentan con potencial eólico aprovechable presentan patrones de comportamiento cíclicos. Así para el correcto diseño de un sistema de generación eoloeléctrico es primordial el estudio del comportamiento de la velocidad del viento durante al menos dos años, que permita crear una base de datos de viento para la proyección de posibles emplazamientos.

Tamaño de almacenamiento (kWh)	0	10	30	50
Energía generada por el aerogenerador(MWh)	65.86	65.86	65.86	65.86
Energía entrante al electrolizador (MWh)	53.59	55.34	57.07	58.15
Volumen de H ₂ generado por el electrolizador (Nm ³)	11,120	11,463	11,809	12,028
Tiempo de operación del electrolizador (%)	82.0	82.2	82.9	83.3
Perdida de energía almacenada(MWh)	0	0.42	0.85	1.13
Perdidas en la carga (MWh)	11.44	9.28	7.16	5.83

Tabla 1.1: Resultado de Dutton del efecto del sobredimensionamiento de una turbina en un sistema con almacenaje de energía. Datos Velocidad media del viento = 8 m/s; potencia generador eólico = 15 kW; potencia del electrolizador= 10kW periodo = 1 año

Con la idea de programar el despacho de energía eléctrica generada a partir del viento se han propuesto sistemas híbridos con almacenamiento de energía en medios físicos (como tanques elevados) y químicos (como baterías convencionales). Se han llevado a cabo investigaciones y desarrollos en sistemas híbridos donde el aerogenerador está acoplado a un electrolizador cuya función es generar hidrógeno a partir de la electrolisis del agua, el hidrógeno generado es almacenado y posteriormente aprovechado por una o varias celdas de combustibles que son dispositivos electroquímicos que utilizan el hidrógeno para generar energía eléctrica.

Es común pensar en sistemas híbridos con almacenamiento de hidrógeno operando en locaciones aisladas de la red eléctrica, donde la fuente de energía proviene de arreglos fotovoltaicos para alimentar el electrolizador. Sin embargo, recientemente se han empezado a utilizar generadores eoloelectrónicos para este fin, ya que los costos de generación eléctrica mediante tales dispositivos son menores.

El estudio de los sistemas de energía híbridos generador eoloelectrónico-celda de combustible es reciente pues inició hace 5 años aproximadamente, por lo que el estudio del comportamiento, características físicas y de acoplamiento de los sistemas de este tipo se han enfocado a maximizar el rendimiento, estudiar el comportamiento del sistema y observar su competitividad frente a otros sistemas de energía.

Iqbal (Iqbal, 2003) estudió el comportamiento y control de un sistema de energía híbrido generador eólico-celda de combustible mediante su simulación, presentando las respuestas del sistema ante cambios bruscos en la velocidad del viento o en la carga conectada al sistema, encontrando que bajo dichos cambios el sistema de energía híbrido retornaba a un estado estable dentro de un lapso de 30 segundos.

A mediados del año 2000, Dutton (Dutton et al., 2000) concluyó que la generación de hidrógeno por medio de energías renovables no es en general competitiva en comparación con la generación de hidrógeno a través de combustibles fósiles. Para el caso de sistemas de energía híbridos conformados por un generador eólico y una celda de combustible la generación de hidrógeno es competitiva y el desempeño del sistema es óptimo, sólo si se cuenta con un exceso de producción de energía del aerogenerador en relación con la carga. Así la energía de superávit está disponible para la producción de hidrógeno, teniéndose un sobredimensionamiento del 25 al 50% del aerogenerador con respecto al electrolizador e introduciendo un sistema de almacenamiento para el exceso de producción de energía. En la tabla 1.1 se muestran los principales resultados del estudio de Dutton.

En el 2003 Khan (Khan et al., 2005) realizó el modelado dinámico y simulación, a través del software comercial MATLAB, de un sistema de energía híbrido generador eólico-celda de combustible de 400 W, en donde la energía se puede proveer a la carga por el generador eólico, la celda de

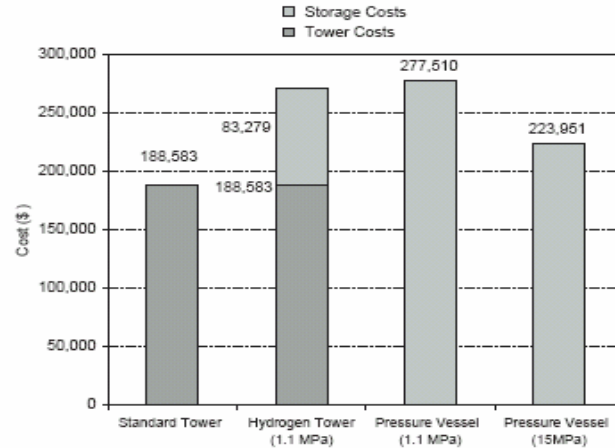


Figura 1.7: Comparación de costo de capital para opciones de almacenamiento de 941 kg de hidrógeno (Tomado de Kottenstette et al. 2004)

combustible o ambos. En la simulación se estimó que los transitorios del sistema eran de 1 a 5 segundos. Estos tiempos de transitorios están dentro del rango adecuado para el desempeño del sistema de energía híbrido.

Un punto importante relacionado con la generación de hidrógeno por medio de sistemas de energía renovables es el almacenamiento adecuado del hidrógeno, en este sentido, Kottenstette (Kottenstette, 2003) propuso aprovechar la construcción de grandes plantas de energía eólica a gran escala para almacenar hidrógeno dentro de las torres de los aerogeneradores, las cuales son normalmente huecas y sólo se tendrían que considerar algunos materiales adecuados y arreglos al diseño para utilizarlas para el almacenamiento de hidrógeno a gran escala, mediante el análisis de esta posibilidad para una aerogenerador de 1.5 MW (84 m de alto) se obtuvo un costo de \$88/kg de hidrógeno almacenado, este costo es el 30% del costo de almacenar hidrógeno en recipientes presurizados convencionales.

Se estima que en el futuro el hidrógeno sustituirá a los combustibles fósiles en el automóvil, lo que se traducirá en una reducción importante de emisiones contaminantes a la atmósfera, en este sentido González (González et al., 2004) efectuó el análisis, para Irlanda, del número de autos movidos por hidrógeno, producido por plantas eólicas, y la mitigación de CO₂ que se contribuirá con este cambio como se muestra en la tabla 1.2.

En relación con estudios de sustentabilidad de los sistemas de energía de hidrógeno, a principios del 2004 Afgan presentó un estudio relacionado con los aspectos económicos, aspectos ambientales y sociales de sistemas generadores de hidrógeno basados en: celdas de combustibles de ácido fosfórico PAFC, celdas de combustible de oxido sólido SOFC, sistema basado en gas natural, sistema fotovoltaico y un sistema de energía basado en generador eoloelectrico. En su investigación Afgan reporta para el caso de aerogeneradores que los aspectos antedichos son competitivos en comparación con los otros sistemas analizados.

Como bien se sabe, una de las grandes ventajas del uso de las energías renovables en la generación de hidrógeno sobre la producción basada en combustibles fósiles es la reducción de gases contaminantes. En esta dirección y con base en el estudio realizado por Afgan, Koroneos (Koroneos, 2004) estudió el impacto ambiental de la generación de hidrógeno por medio de fuentes renovables a través del análisis del ciclo de vida. En su estudio Koroneos considero como fuentes de energía: sistemas

Capacidad eólica instalada (MW)	Autos abastecidos por hidrógeno	Reducción de CO ₂ (kt)
0	0	0
700	0	0
750	15	0.5
800	56	0.18
900	334	1.04
1000	1103	3.45
1200	5055	15.8
1500	19,749	61.7
2000	68,801	215
2500	135,160	423
3000	209,580	655
3500	288,681	903
4000	370,953	1160
4500	455,338	1424
5000	541,422	1693

Tabla 1.2: Autos alimentados por hidrógeno y mitigación de CO₂ calculado por Gonzáles (adaptado de Gonzáles et al. 2004)

fotovoltaicos, energía eólica, energía térmica, energía hidráulica y biomasa (ver figura 1.8). En sus conclusiones menciona que la generación de hidrógeno a través de energía eólica presenta un menor impacto ambiental, a nivel de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los otros sistemas.

A principios del 2005 Sherif (Sherif et al., 2005) estudió los acontecimientos de los últimos años en lo referente a energías renovables, políticas para promover su uso, y tendencias de la industria del sector. En lo referente al sector del hidrógeno. Sherif afirma que la era de la economía del hidrógeno puede ya haber iniciado y que es inevitable que se llegue a ella en el futuro, entendiendo por economía del hidrógeno el sistema en el cuál uno de los energéticos universales es el hidrogeno y el otro la electricidad. Una clara tendencia hacia la economía del hidrógeno puede verse en los Estados Unidos que a través de su departamento de energía ha dado inicio al plan nacional del hidrogeno denominado “Visión Nacional del hidrógeno”, el cual es un documento con los objetivos a cumplir tanto en producción, almacenamiento, distribución, lineamientos de seguridad y demás aspectos relacionados con el hidrógeno, tanto para aplicaciones fijas como portátiles. En las conclusiones de dicho plan se indica que el hidrógeno tendrá futuro como combustible y que la generación del mismo a través de la energía proporcionada por generadores eoloelectricos, al menos para su aplicación en sitios aislados, presentará un gran potencial de desarrollo en los próximos años tomando en cuenta que la industria de generación eoloelectrica es la de mayor crecimiento dentro de las energías renovables.

En la revisión de la literatura hemos encontrado que se han realizado esfuerzos en diferentes países para desarrollar sistemas que permitan la obtención de hidrógeno mediante energía eólica y sistemas fotovoltaicos, sin embargo los estudios de caso corresponden con condiciones particulares para cada región.

Con base en lo expuesto hasta ahora, podemos formular las siguientes preguntas: ¿Un sistema híbrido con almacenamiento de hidrógeno funcionaría eficientemente si la única fuente de energía

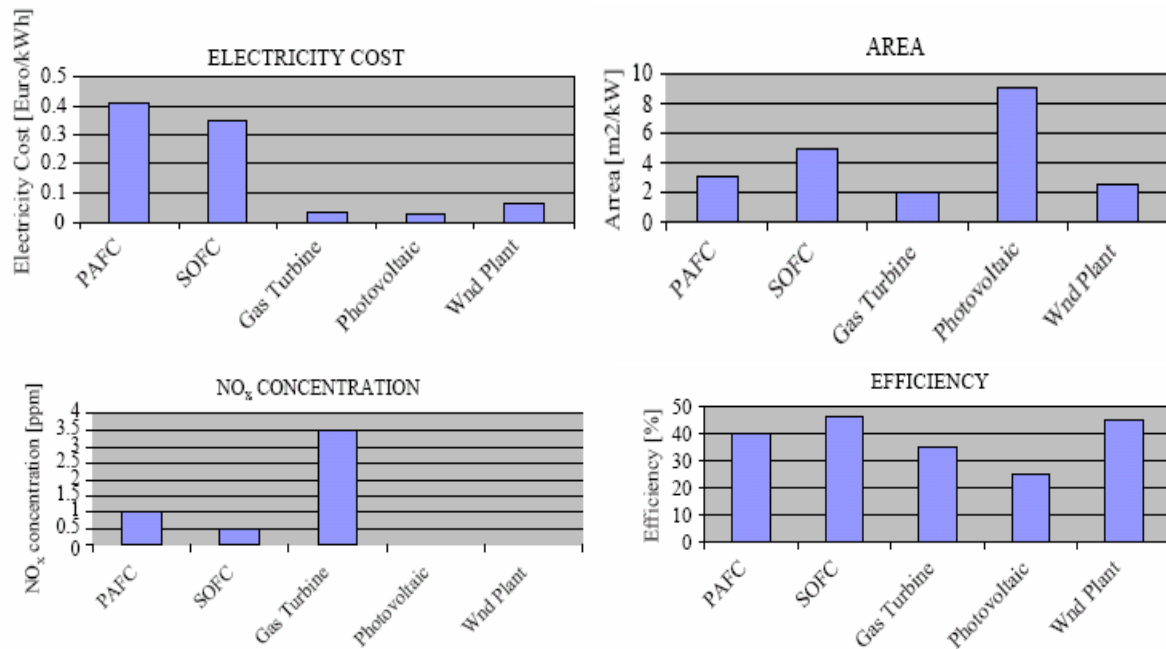


Figura 1.8: Resultados de la investigación de Afgan sobre la generación de hidrógeno por varios métodos (Tomado de Afgan et al. 2004).

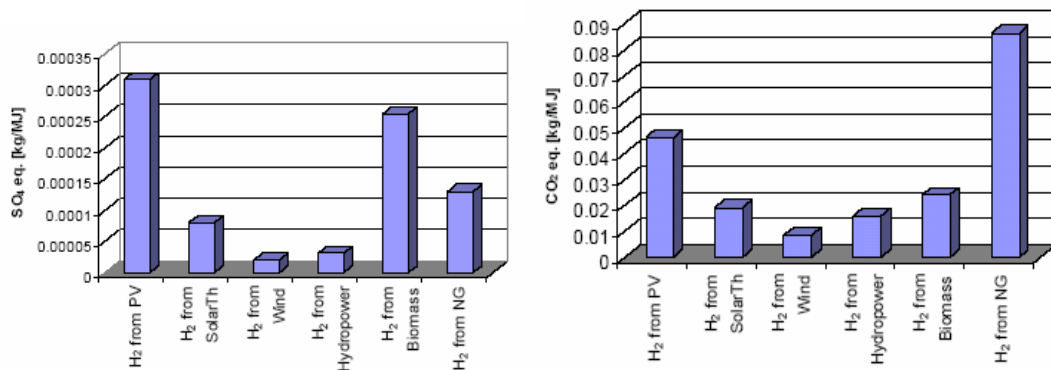


Figura 1.9: Resultados de Koroneos de las Emisiones de SO₄ y CO₂ equivalentes en la producción de hidrógeno por diferentes medios (tomado de Koroneos, 2004).

primaria es la energía eólica? ¿Podría implementarse en México un sistema híbrido aerogenerador-celda de combustible para proveer de energía a comunidades aisladas? ¿Es posible crear un sistema rentable donde el generador eólico alimente a la carga eléctrica en momentos de suficiente recurso eólico y que la celda de combustible sea la que provea de energía cuando dicho recurso no sea el adecuado? ¿Cómo debe operar el sistema híbrido durante el superávit y como durante la insuficiencia de recurso eólico?

Para resolver estas interrogantes es posible utilizar algunas herramientas comerciales, como los programas de cómputo, entre las que destacan (Guillén y Fortino, 2004):

a) HOMER. Es una herramienta que es útil en la determinación del menor costo de la energía generada en sitios aislados, mediante simulaciones de cada hora de funcionamiento de sistemas eléctricos analizando los costos de ciclos de vida útil. Sin embargo esta herramienta ampliamente utilizada resulta una caja negra ya que no se tiene acceso al código fuente, lo que impide conocer la manera en que se llevan a cabo los cálculos y por tanto la certeza de los mismos.

b) RETscreen. Es una herramienta de cómputo enfocada principalmente a la medición de emisiones contaminantes evitadas por el uso de fuentes renovables de energía, la cual evalúa, analiza la producción de energía, costos en ciclo de vida útil y emisiones evitadas; todo para las distintas de generación eléctrica disponibles. Si bien esta herramienta de cómputo es de arquitectura abierta y que utiliza Excel como base no se encuentra lo suficientemente probada y validada, por lo que los resultados pueden ser cuestionados

c) ViPOR. El cuál es un modelo de optimización para sistemas de electrificación de pequeñas comunidades donde dado un mapa de la pequeña comunidad e información sobre la carga y costos de equipos ViPOR determina cuáles deben ser alimentados por sistemas aislados y cuales por la red centralizada de distribución. Esta herramienta persigue objetivos y alcances diferentes al de este trabajo

d) SIMULINK. Es una plataforma de modelación multidominio y diseño de sistemas dinámicos. Posee un ambiente gráfico interactivo para la visualización de los resultados de la simulación así como para visualizar los resultados en tiempo real.

En este trabajo utilizamos el Programa Simulink para realizar la simulación de un sistema de energía híbrido eólico-hidrógeno, debido a que dicho programa está más enfocado al aspecto funcional-operativo de los sistemas además de que al contrario de los otros programas comerciales los diversos componentes del sistema no funcionan como “cajas negra” sino que es necesario programar cada uno de ellos lo que nos da una mejor perspectiva en cuanto al comportamiento del sistema modelado, tal y como lo veremos más adelante en este trabajo.

Hasta ahora hemos presentado aquellos estudios más relevantes relacionados con los sistemas de energía híbridos cuya fuente primaria en la energía eólica y que están relacionados con la producción de hidrógeno.

Para dar consistencia a nuestro trabajo de investigación, en el siguiente capítulo se presentan las principales características de la energía eólica, como son la evaluación del recurso eólico, las técnicas estadísticas para la reducción de datos anemométricos, así como el análisis para la estimación de la producción de electricidad mediante aerogeneradores.

Capítulo 2

EL VIENTO

El viento, al igual que otras fuentes renovables de energía, tiene su origen en la energía solar. Alrededor del 1 al 2 % de la energía proveniente del Sol se transforma en energía eólica (www.windpower.org, 2003). El viento se crea por la diferencia de presiones en la superficie terrestre originada por el calentamiento desigual debido a la manera en que llega la radiación solar. La radiación solar absorbida en el ecuador es mayor que la energía absorbida en los polos, esta variación provoca la formación de celdas convectivas en las capas inferiores de la atmósfera, así en un modelo simple de flujo de la masa de aire más caliente presente en el ecuador tiende a subir (ya que el aire más caliente es menos denso que el aire frío) mientras que el aire presente sobre los polos tiende a bajar, originándose un ciclo entre estas corrientes de aire ascendentes y descendentes dando lugar a los vientos geostróficos.

2.1 MECANISMOS DEL MOVIMIENTO DEL VIENTO

La circulación de los vientos se ve influenciada principalmente por las siguientes fuerzas atmosféricas, que son:

a) Fuerza de presión. El movimiento de las grandes masas de aire (viento) se debe al gradiente de presión horizontal. Considérese el volumen de control de sección transversal unitaria con una longitud Δx , como se muestra en la figura 2.1, siendo P la presión en un lado y $(P+\Delta P)$ la presión en el otro extremo. La presión neta ΔP origina que el contenido del volumen de control se mueva de la zona de alta presión hacia la zona de baja presión, la fuerza resultante por unidad de masa en la dirección x es la denominada fuerza de gradiente de presión y esta dada por:

$$F_{PX} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta P x}{\Delta x}, \quad (2.1)$$

donde ρ [kg/m^3] es la densidad del aire, y $(\Delta P x / \Delta x)$ es el gradiente de presión normal a las líneas de presión constantes o isobaras, lo que se traduce en el desplazamiento horizontal de las masas de aire. El signo negativo obedece a que la fuerza F_{PX} actúa en la dirección en que decrece la presión.

Similarmente, el gradiente de presión ΔP_z en la dirección vertical (z) está dada por:

$$\Delta P_z = -\rho g \Delta z, \quad (2.2)$$

dando como resultado el movimiento vertical de las masas de aire.

b) Fuerza de Coriolis. La fuerza de Coriolis es una fuerza que tiene su origen en la rotación de la Tierra y está definida como:

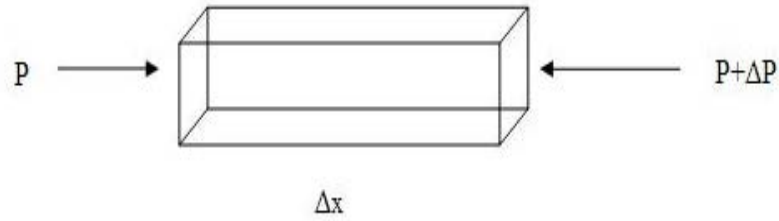


Figura 2.1: Gradiente de presión horizontal.

$$F_C = 2\omega \sin(\phi)v, \quad (2.3)$$

donde ω es la velocidad angular de la Tierra ($7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$), $\phi[^\circ]$ es la latitud y $v[m/s]$ es la velocidad del viento. Debido a este fenómeno en el hemisferio norte el viento tiende a girar en el sentido contrario a las manecillas del reloj (visto desde arriba, en el polo norte) cuando se acerca a un área de bajas presiones. En el hemisferio sur el viento gira en sentido de las manecillas del reloj en la cercanía de áreas de baja presión.

c) Viento geostrófico. El movimiento de las masas de aire que tienden a ser paralelas a las líneas isobáricas tienen su origen en el balance de fuerzas del gradiente de presión y la fuerza de Coriolis (ecuaciones 2.1 y 2.3), a saber,

$$\left(\frac{-1}{\rho}\right) \left(\frac{\Delta Px}{\Delta x}\right) = 2\omega \sin(\phi)v. \quad (2.4)$$

El valor de la velocidad del viento que satisface la ecuación 2.4 es el denominado viento geostrófico (Rohatgi, 1994). Así los vientos geostróficos son generados, principalmente, por las diferencias de temperatura, así como por las de presión, y apenas son influenciados por la superficie de la tierra (ver figura 2.2).

d) Viento gradiente. Consideremos ahora el caso de áreas de alta y baja presión causadas por líneas isobáricas que siguen un patrón curvilíneo, es decir los valores de presión son iguales en patrones circulares. Al igual que en el caso del viento geostrófico existe un balance de fuerzas entre el gradiente de presión y la fuerza de Coriolis pero debido a la curvatura de las líneas isobáricas el viento experimenta una fuerza centrífuga por unidad de masa a la cual se le denomina viento gradiente. En un flujo alrededor de un centro de baja presión el viento gradiente está dado por:

$$v_{gr}^2 = \frac{\left(\frac{-1}{\rho}\right) \left(\frac{\Delta Px}{\Delta x}\right) r}{2\omega \sin(\phi)v}, \quad (2.5)$$

donde $r[m]$ es el radio de curvatura., como se muestra en la figura 2.3.

e) Efecto brisa terral. El movimiento del viento originado por este efecto se da principalmente en zonas costeras y ocurre debido al contraste térmico entre la tierra (playa) y un gran cuerpo de agua adyacente (el océano). Durante el día, el aire situado sobre la playa refleja más energía a la atmósfera que el aire situado sobre el mar, por ello la presión de la masa de aire que se encuentra sobre la superficie del agua es mayor que la presión del aire situado sobre la playa, resultando en

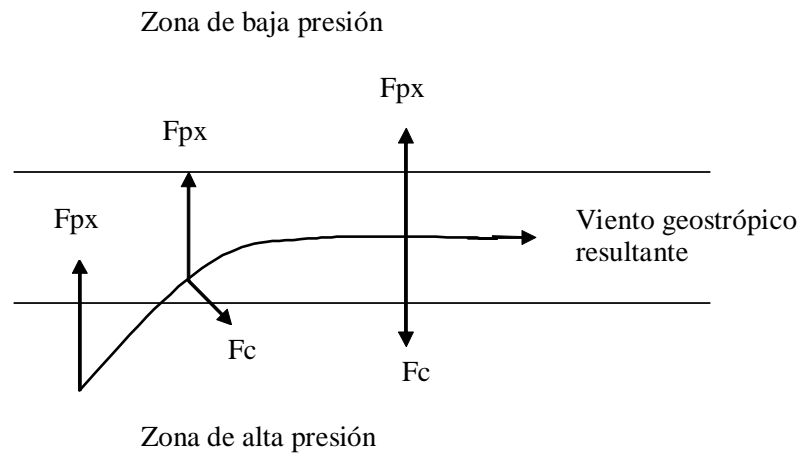


Figura 2.2: Generación de viento geostrófico por el balance de fuerzas de F_{PX} y F_C .

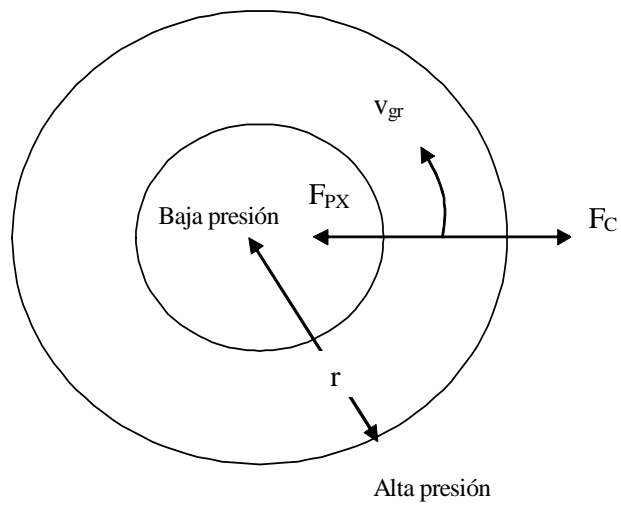


Figura 2.3: Viento gradiente en el hemisferio norte.

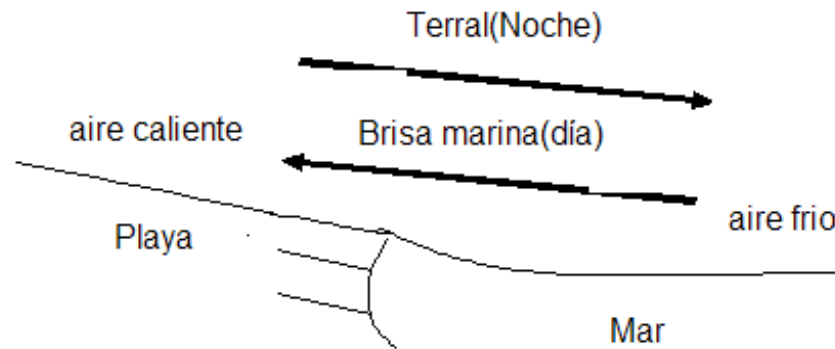


Figura 2.4: Efecto Brisa Marina-Brisa Terral en la costa.

movimiento del aire de la zona de alta a baja presión (es decir del mar hacia la costa). Por las noches este proceso se revierte ya que en esos instantes la temperatura de la tierra es más fría que la temperatura de la superficie del agua, originándose el movimiento del viento en dirección contraria al del ocurrido durante el día, denominado terral como se muestra en la figura 2.4.

f) Vientos valle-montaña. El movimiento del viento debido al efecto valle-montaña (ver figura 2.5) se origina por la diferencia de presión presente entre las cadenas montañosas y los valles. Durante el día el aire caliente presente sobre las montañas reemplaza al aire frío presente en el valle, el cuál al ser más pesado tiende hacia abajo y a correr cuesta arriba para reemplazar al aire caliente, durante la noche la dirección del viento se revierte por lo que la circulación del viento de la montaña hacia el valle.

2.2 PERFIL VERTICAL DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Los vientos están mucho más influenciados por la superficie terrestre a altitudes de hasta 100 metros. El viento es frenado por la rugosidad de la superficie de la tierra y por los obstáculos. La velocidad del viento varía directamente proporcional con la altura, esto es, a menor altitud el viento se ve más afectado por la rugosidad y obstáculos del terreno ya que existe mayor fricción y se generan turbulencias. Para modelar el perfil vertical de la velocidad del viento existen dos métodos generales, el método de perfil logarítmico y el método de ley de potencia, que se describen a continuación.

2.2.1 PERFIL LOGARÍTMICO

La expresión de perfil logarítmico se utiliza para estimar la velocidad del viento a una altura deseada, tomando como base la velocidad del viento conocida a una altura dada. La expresión del perfil logarítmico es (Rohatgi, 1994):

$$\frac{v}{v_{ref}} = \frac{\ln\left(\frac{h}{h_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{h_0}\right)}, \quad (2.6)$$

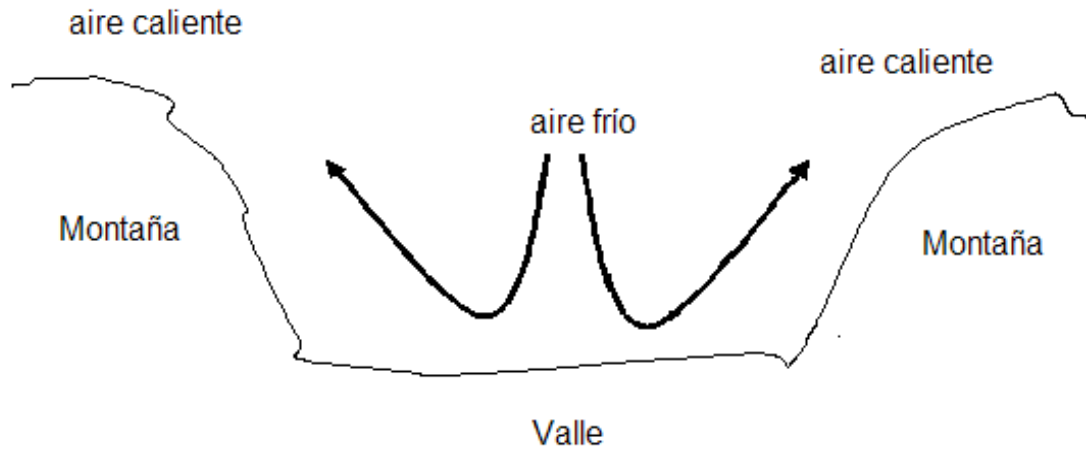


Figura 2.5: Viento valle montaña.

donde $v[m/s]$ es la velocidad estimada del viento a la altura que se desea conocer, $v_{ref}[m/s]$ es la velocidad del viento a la altura de referencia donde se cuenta con mediciones, $h[m]$ es la altura a la que se desea estimar la velocidad del viento, $h_{ref}[m]$ es la altura de referencia, es decir, la altura a la que se realizaron mediciones y $h_0[m]$ es la longitud de la rugosidad del terreno. La longitud de la rugosidad del terreno representa en cierta medida el grado de obstáculo que presenta éste a la circulación del viento, algunos valores de h_0 se muestran en la tabla 2.1 (Burton, 2001)

2.2.2 PERFIL DE LEY DE POTENCIA.

Al igual que el perfil logarítmico, la ley de potencia modela el perfil vertical de velocidad del viento. Este modelo fue propuesto por Hellman en 1915 (Hellman, 1915) y se usa para estimar la velocidad del viento a una determinada altura con base en datos medidos a una altura dada, se expresa mediante:

$$v = v_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha, \quad (2.7)$$

donde $\alpha[-]$ es el índice de la ley de potencia para la velocidad del viento, el cuál depende de la rugosidad del terreno. Se ha encontrado que el valor de α varia en relación al tipo de terreno por donde pasa el viento y por el efecto de varios parámetros como la elevación, la hora del día, la estación del año, la direccionalidad de viento, entre otros (Manwell, 2002). Se han desarrollado métodos para determinar el valor de α , sin embargo algunos investigadores sugieren que el cálculo de este índice debe ser simple y obtenido empíricamente, por lo que es común usar el valor de α que más se ajuste a los datos disponibles. A continuación presentamos dos métodos para el cálculo del valor de α .

a) Correlación para el exponente de la ley de potencia como una función de la velocidad y de la altura. Justus en 1978 (Justus, 1978) propuso la obtención del parámetro α mediante la siguiente relación empírica:

Descripción del terreno	$h_0[x10^{-3}m]$	α
llano muy liso con hielo o lodo	0.01	-
Superficie nevada	3.00	0.10
Campo barbechado	30.00	0.13
Plantaciones	50.00	0.19
Suburbios	1500	0.32

Tabla 2.1: Algunos valores de la rugosidad de la superficie y del índice de la ley de potencia para diferentes tipos de terrenos.

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(v_{ref})}{1 - 0.088 \ln(\frac{h_{ref}}{10})}. \quad (2.8)$$

donde $v_{ref}[m/s]$ es la velocidad del viento a la altura de referencia donde se cuenta con mediciones y $h_{ref}[m]$ es la altura de referencia. Los valores numéricos en la ecuación 2.8 son valores empíricos determinados por Justus.

b)Correlación dependiente de la rugosidad de la superficie: En el trabajo de Counihan (Counihan, 1975) se propone el cálculo de α mediante siguiente expresión empírica:

$$\alpha = 0.096 \log_{10} h_0 + 0.016(\log_{10} h_0)^2 + 0.24. \quad (2.9)$$

donde $h_0[m]$ es la longitud de la rugosidad del terreno. Cabe señalar que la correlación 2.8 depende de datos medidos de velocidad del viento a una cierta altura, mientras que la correlación 2.9 depende de la rugosidad del terreno del terreno.

2.2.3 VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE CON RESPECTO A LA ALTURA

Para el cálculo de generación eoloelectrónica, se debe considerar una corrección por la variación de la densidad del aire en función de la altura. Con base en la norma IEC-61400-12 (IEC,1998) de la Comisión Electrotécnica Internacional, para aquellos aerogeneradores con control por desprendimiento de flujo (*stall regulation*), que son aquellos que mediante las propiedades aerodinámicas de las aspas limitan el torque producido a altas velocidades, la corrección de la curva de potencia se debe hacer de acuerdo con la ecuación:

$$P_c = P_n \frac{\rho}{\rho_{ref}}, \quad (2.10)$$

donde $P_c [W]$ es la potencia generada como función de la densidad del aire atmosférico del sitio, $P_n [-]$ es la curva de potencia del aerogenerador, $\rho_{ref} [kg/m^3]$ es la densidad del aire de referencia (comúnmente $1.225 kg/m^3$) y $\rho [kg/m^3]$ es la densidad del aire de la localidad.

Para aquellos aerogeneradores con control de ángulo de ataque (*pitch regulation*), que son aquellos que reducen el ángulo de incidencia del viento para evitar daños al mismo cuando se presentan grandes velocidades de viento, se debe aplicar la corrección de acuerdo con la expresión:

$$V_c = \frac{V_n}{\left(\frac{\rho}{\rho_{ref}}\right)^{1/3}}, \quad (2.11)$$

donde $V_c[m/s]$ es la velocidad corregida y $V_n[m/s]$ es la velocidad a la densidad de referencia. Es importante indicar que la corrección que se lleva a cabo mediante la ecuación 2.11, se trata de una corrección aplicada a la velocidad del viento, por lo que la curva potencia se desplaza sobre el eje horizontal.

Para el cálculo de la densidad del aire en función de la altura y la temperatura promedio, ésta se puede calcular mediante (Burton, 2001):

$$\rho = 1.225 \exp \left(\left(-\frac{h}{8435} \right) - \left(\frac{T - 15}{288} \right) \right), \quad (2.12)$$

donde $h[m]$ es la altura del sitio sobre el nivel del mar (S.N.M.) y $T[^\circ C]$ es la temperatura ambiente promedio del sitio.

2.3 POTENCIA DEL VIENTO

Cuando el viento es atajado por un objeto, el viento transfiere su energía cinética, y si dicho objeto se mueve decimos que el viento ha desempeñado un trabajo. La cantidad de energía contenida en el viento es función de su velocidad y su masa, por lo tanto cuanto mayor sea la velocidad del viento mayor será la energía disponible y su capacidad para realizar trabajo.

La relación entre la masa, la velocidad y la energía está dada por la ecuación de la energía cinética. Considérese un flujo laminar perpendicular a la sección transversal de un cilindro (figura 2.6) moviéndose a una velocidad v , la energía cinética para dicho flujo está dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2, \quad (2.13)$$

donde m es la masa de aire en movimiento. Por otro lado considerando que la potencia está definida como la energía por unidad de tiempo, tenemos:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 \quad (2.14)$$

donde P es la potencia y dm/dt representa el flujo de aire a través del cilindro. Ahora bien la masa contenida en el cilindro es igual con:

$$m = \rho AL, \quad (2.15)$$

donde A es el área de la sección transversal de cilindro y L es la longitud del cilindro. Y como la longitud del cilindro dividida por unidad de tiempo es igual a la velocidad tal que $\frac{dL}{dt} = v$ el flujo de aire a través del cilindro está dado por:

$$\frac{dm}{dt} = \rho Av, \quad (2.16)$$

sustituyendo la relación 2.16 en la ecuación 2.14, la energía por unidad de tiempo y por unidad de área está dada por:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3. \quad (2.17)$$

Velocidad del viento[m/s]	Potencia/Área[W/m ²]
0	0
1	0.61
2	4.90
3	16.54
4	39.20
5	76.56
6	132.30
7	210.09
8	313.60
9	446.51
10	612.50

Tabla 2.2: Densidad de potencia según la velocidad del viento

De la ecuación 2.17 se puede observar que el parámetro más importante involucrado en la potencia contenida en el viento es la velocidad del mismo, ya que al ser una función cúbica por cada vez que se duplica la velocidad del viento se obtiene ocho veces más potencia, tal como se muestra en la tabla 2.2.

2.3.1 LIMITE DE BETZ

La ecuación 2.17 es la potencia máxima que se puede obtener del viento de manera ideal, ahora bien, un generador eoloelectrico no es capaz de transformar toda la potencia que contiene el viento, ya que esto implicaría haber frenado completamente la velocidad del viento. El desempeño de un generador eoloelectrico está caracterizado por el coeficiente de potencia C_p dado por:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho v^3 A}. \quad (2.18)$$

tal que C_p representa el límite máximo de la fracción de la potencia en el viento que se puede transformar mediante un aerogenerador. Betz (Betz, 1919) demostró que el valor máximo del C_p para un aerogenerador es:

$$C_{p,\max} = 16/27 = 0.59. \quad (2.19)$$

Es decir un aerogenerador ideal sólo puede extraer como máximo el 59 % de la potencia contenida en el viento.

2.4 TOMA DE DATOS DE LA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO

La medición de la velocidad del viento es el parámetro más importante en las acciones preliminares al emplazamiento de un generador en un sitio dado ya que, como puede verse en la ecuación 2.17, si la velocidad del viento se duplica la cantidad de energía contenida será ocho veces mayor. Es muy

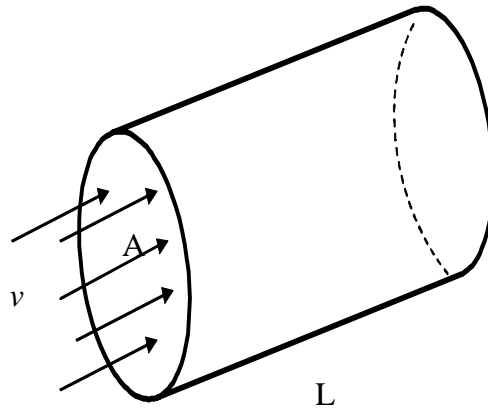


Figura 2.6: Flujo de aire a través de un cilindro, simula el flujo de aire a través del rotor (Adaptado de Manwell, 2002).

importante resaltar que para lograr una medición veraz de la velocidad del viento en un sitio dado se requiere la instalación de anemómetros de alta calidad y que estén adecuadamente referenciados y calibrados con instrumentos patrones. Dichos anemómetros deberán presentar un error de medición menor que el 1% para asegurar que los datos obtenidos durante la medición de sean confiables y pueden ser utilizados en los cálculos pertinentes para la estimación del potencial eólico de la zona de interés. Además de la velocidad del viento es importante determinar la dirección predominante de los vientos en el sitio del posible emplazamiento con la finalidad de conocer la estabilidad del flujo de aire y determinar que no se trata de un sitio donde ocurren incrementos de la velocidad del viento como consecuencia de rachas o turbulencias. Es por tal razón que durante la medición de la velocidad del viento se lleva también a cabo la medición de su dirección mediante la instalación de veletas.

La mejor forma de medir la velocidad del viento para el futuro emplazamiento de una turbina eólica es situar un anemómetro en una torre que tenga la misma altura que la que tendrá el aerogenerador una vez instalado. Esto evita la incertidumbre que conlleva el recalcular la velocidad del viento a una altura diferente. Sin embargo, es práctica común instalar 2 o 3 anemómetros a distintas alturas, ya que con ello se cuenta con información más fidedigna de los datos de velocidad del viento. Además, permite estimar con mayor exactitud el perfil de velocidades en función de la rugosidad del terreno. En la práctica, para conformar una red anemométrica, es común colocar torres anemométricas con una separación de 1 km. entre ellas cuando se trata de terrenos llanos y con poca vegetación o bien la separación es de 200 m en terreno escarpado o con mucha vegetación. Los datos de la red anemométrica permiten evaluar el comportamiento del recurso eólico en la totalidad del terreno.

Debido al gran número de datos obtenidos por el sistema anemómetro-veleta, ya que las mediciones se realizan cada segundo y estos datos son registrados como el promedio cada 10 minutos (se sigue esta metodología debido a que generalmente las variaciones significativas de la velocidad del viento para el cálculo de la energía se encuentran comprendidas dentro de un periodo que va desde 1 segundo hasta 10 minutos), se requiere de un sistema de adquisición de datos y un sistema de almacenamiento robusto y que pueda operar de manera independiente mediante baterías durante un largo período de

tiempo (1-2 meses) ya que es común que las torres anemométricas se encuentren en lugares alejados de la red eléctrica (Cheremisnoff, 1978). Es importante aclarar que en este trabajo consideramos principalmente la obtención de energía mediante el análisis de la velocidad de viento para tres casos de estudio, por lo la dirección del viento no fue considerado en el análisis.

2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Si se observa la ecuación 2.17, podría pensarse que si conocemos la velocidad media del viento, también conocemos la potencia media del viento, por lo que parecería correcto utilizar la velocidad media del viento para calcular cuanta potencia generaría un aerogenerador que este emplazado en un sitio dado durante un año. Hacer uso de esta última afirmación nos acarrearía el cometer un grave error en el análisis de los datos de la velocidad del viento, ya que no tomaríamos en cuenta el efecto cúbico que tiene la velocidad del viento en la generación de potencia, debido a que cada vez que se duplica la velocidad del viento se tiene un aumento de ocho veces la potencia disponible. Es por ello que para determinar el potencial de energía eólica que tiene una región dada se utiliza generalmente el análisis estadístico de los datos de la velocidad del viento.

En general, dos funciones de distribución de probabilidad son usadas para el análisis de datos de viento: La distribución Weibull y la distribución de Rayleigh. La primera se basa en dos parámetros, el de escala c y el de forma k , y dicha distribución puede representar una vasta variedad de regímenes de viento. La distribución de Rayleigh es un caso particular de la distribución de Weibull y resulta en muchos casos una adecuada descripción para regímenes típicos de viento.

2.5.1 DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

La función de distribución de Weibull (figura 2.7) está definida por:

$$F_W(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right), \quad (2.20)$$

donde $v[m/s]$ es la velocidad del viento, $c[m/s]$ es el parámetro de escala de weibull, y $k[-]$ es el parámetro de forma de la distribución de Weibull.

Para determinar los parámetros k y c existe el método del análisis de la desviación estándar, en donde la relación de la desviación estándar con la velocidad media del viento está dada por (Rohatgi et al 1994):

$$\frac{\sigma}{\bar{v}} = \frac{\sqrt[2]{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}, \quad (2.21)$$

donde $\sigma[-]$ es la desviación estandar del conjunto de datos de velocidad del viento, $\bar{v}[m/s]$ es la velocidad media del viento y Γ es la función Gamma. La relación entre k y c está dada por:

$$\frac{k}{c} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right). \quad (2.22)$$

Como caso particular de la distribución de Weibull se tiene la distribución de Rayleigh que se presenta en la siguiente sección.

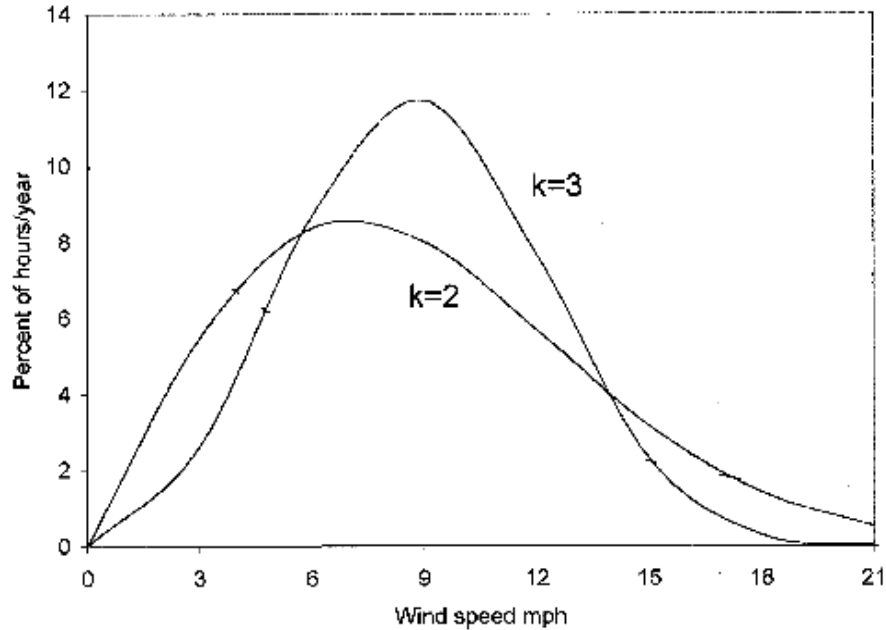


Figura 2.7: Distribución de Weibull con parámetro de escala $c=10$ y parámetros de forma $k= 2$ y 3 (tomado de Petal,1999)

2.5.2 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE RAYLEIGH.

La función de distribución de Rayleigh (ver figura 2.8) está definida por (Rohatgi et al 1994):

$$F_R(v) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^2 \exp \left[\frac{-\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^2 \right]. \quad (2.23)$$

2.5.3 OTRAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN

Aunque la distribución de Weibull y la distribución de Rayleigh permiten estimar el régimen de viento de la mayoría de los sitios, esto no siempre es así debido a que el sitio de estudio puede presentar diferentes regímenes de viento para invierno o verano, o presentar distribuciones particulares debido a alteraciones geográficas. Por lo anterior es importante hacer notar que existen otras funciones de distribución que pueden ser aplicadas en el análisis del recurso eólico de un sitio dado, entre las cuales destacan las siguientes:

a) Distribución Bimodal. La función de distribución Bimodal se caracteriza por presentar una unión de 2 funciones de distribución (Ver figura 2.9) y está definida por:

$$F_B(v) = p[F_W(v)]_{izq} + (1 - p)[F_W(v)]_{der} \quad (2.24)$$

Esta distribución puede estar compuesta por dos distribuciones de Weibull, a saber:

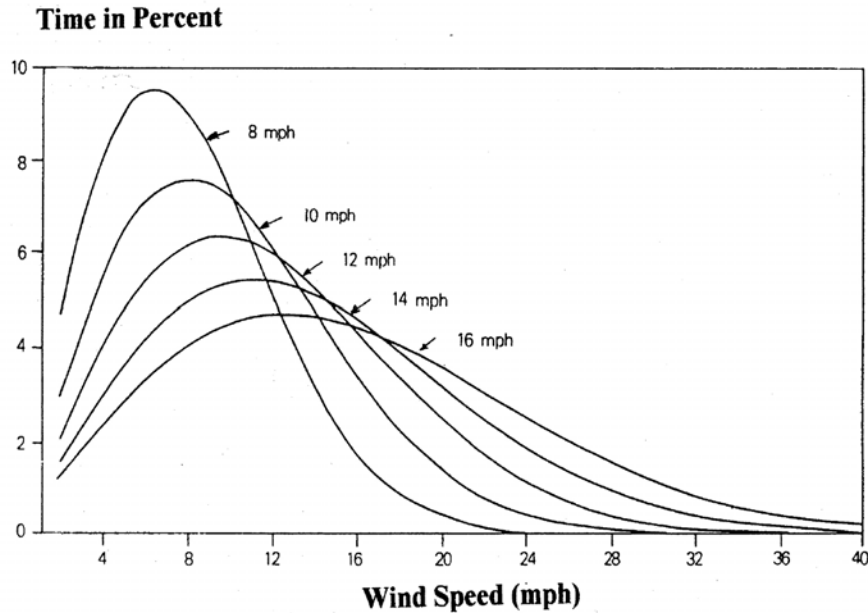


Figura 2.8: Distribución de Rayleigh con parámetros de escala c de 8 a 16 mph. (tomado de Patel, 1999).

$$F_B(v) = p \int_0^{\infty} \frac{k_1}{c_1} \left(\frac{v}{c_1}\right)^{k_1-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c_1}\right)^{k_1}\right) dv \quad (2.25)$$

$$+(1-p) \int_0^{\infty} \frac{k_2}{c_2} \left(\frac{v}{c_2}\right)^{k_2-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c_2}\right)^{k_2}\right) dv \quad (2.26)$$

donde $F_B(v)$ [-] es la función de distribución de probabilidad bimodal, v [m/s] es la velocidad del viento, c_1 [m/s] y c_2 [m/s] son los parámetros de escala de la parte izquierda y derecha de la función de distribución Bimodal, respectivamente, k_1 [-] y k_2 [-] son los parámetros de forma de la parte izquierda y derecha de la función de distribución Weibull & Weibull, respectivamente y p es la componente de probabilidad de la parte izquierda de la función de distribución ($0 < p < 1$). La variable p puede hallarse mediante las ecuaciones (Jaramillo, 2004):

$$\bar{v} = p\bar{v}_1 + (1-p)\bar{v}_2 \quad (2.27)$$

y

$$\sigma^2 = p(\sigma_1^2 - (p-1)(\bar{v}_1 - \bar{v}_2)^2) - (p-1)\sigma_2^2 \quad (2.28)$$

donde \bar{v} [m/s] y σ [-] son velocidad media del viento y la desviación estándar de toda la serie de datos, \bar{v}_1 y \bar{v}_2 [m/s] son las velocidades medias del viento de la serie de datos de la giba izquierda y derecha de la función de distribución Weibull & Weibull, respectivamente y σ_1 y σ_2 [-] son las desviaciones estándar de la serie de datos de la parte izquierda y derecha de la función de distribución Weibull &

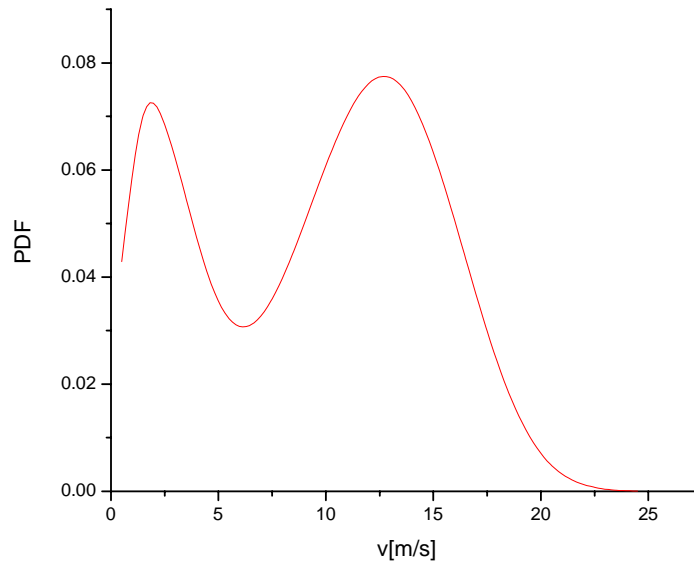


Figura 2.9: Distribución Bimodal con valores de $c_1=3.2$, $c_2=13.7$ y $k_1=1.7$, $k_2=3.9$ y $p=0.29$.

Weibull, respectivamente. En la figura 2.9 se muestra como ejemplo una distribución Bimodal típica que corresponde a La Venta Oaxaca México. Esta función de probabilidad bimodal se compone de dos funciones de distribución de Weibull. La giba izquierda contiene el 29 % de los datos anemométricos y la giba derecha el resto. Es común que este tipo de distribuciones se presente en lugares donde existen 2 fenómenos independientes en la generación de viento.

b) Función de Distribución de Gumbel. La distribución de Gumbel está dada por (McLaughlin, 1999):

$$F_G(v) = \frac{1}{c} \exp \left[\frac{\mu - v}{c} - \exp \left(\frac{\mu - v}{c} \right) \right], \quad (2.29)$$

donde $c[m/s]$ es el parámetro de escala, $v[m/s]$ es la velocidad del viento y $\mu[-]$ es el parámetro de localización. El parámetro μ está dada por la siguiente ecuación (Kotz, 2000):

$$\mu = \bar{v} - 0.45006 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}, \quad (2.30)$$

donde $\bar{v}[m/s]$ es la velocidad media del viento, $n[-]$ es el número de datos. En la figura 2.10 se presenta la representación general de la distribución de Gumbell. En ella puede observarse que el parámetro de localización μ indica el valor de v más probable que ocurra, de los datos aleatorios que se ajusten a esta función de distribución.

c) Función de Distribución de Frechet. La distribución de Frechet está dada por (Kotz 2000):

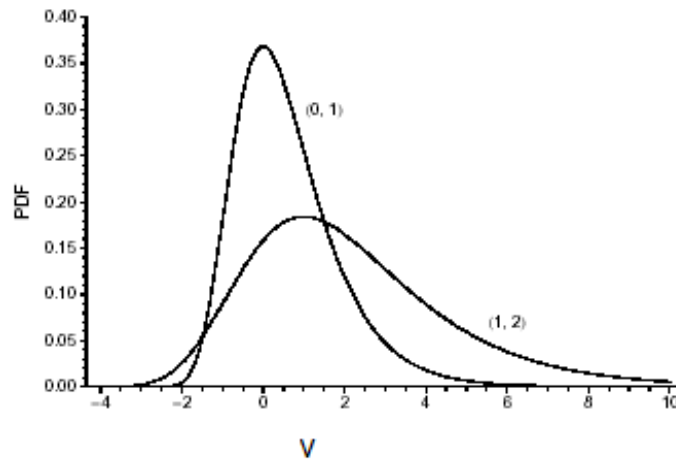


Figura 2.10: Distribución de Gumbel para $\mu = 0, c = 1$ y $\mu = 1, c = 2$, (Adaptado de McLaughlin, 1999)

$$F_F(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{c}{v}\right)^{k+1} \exp\left(-\left(\frac{c}{v}\right)^k\right), \quad (2.31)$$

donde $v[m/s]$ es la velocidad del viento, $c[m/s]$ es el parámetro de escala de Frechet, y $k[-]$ es el parámetro de forma de la distribución de Frechet, el parámetro k puede ser encontrado mediante:

$$\frac{\sigma}{\bar{v}} = \frac{\sqrt[2]{\Gamma\left(1 - \frac{2}{k}\right) - 1}}{\Gamma\left(1 - \frac{1}{k}\right)}, \quad (2.32)$$

donde $\sigma[-]$ es la desviación estándar del conjunto de datos de velocidad del viento, $\bar{v}[m/s]$ es la velocidad media del viento. y Γ es la función Gamma, mientras que la relación entre k y c esta dada por:

$$\frac{k}{c} = \Gamma\left(1 - \frac{1}{k}\right), \quad (2.33)$$

En la figura 2.11 se muestra la forma típica de la distribución de Frechet. En esta figura el valor de $1 m/s$ es el que presenta mayor frecuencia de ocurrencia.

Es importante indicar que la función de distribución de probabilidad que más se aproxime a los datos medidos será la que mayor exactitud brinde al momento de realizar el cálculo de la energía eléctrica generada. El estándar internacional IEC 61400-12 (IEC, 2005) sugiere el uso de la función de distribución de Weibull para estimar la producción anual de energía, sin embargo en algunas regiones del mundo el uso de esta función de distribución, altamente extendida, en el análisis de recurso eólico, puede llevar a tener resultados incorrectos.

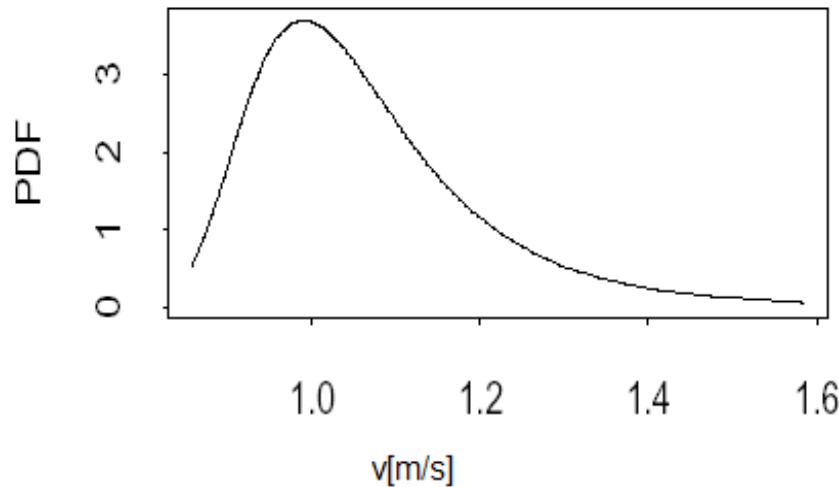


Figura 2.11: Distribución de frechet para $c = 1$ y $k = 10$ (tomado de kutz,1999)

2.6 ENERGÍA EOLOELÉCTRICA

La potencia de salida de un generador eóloelectrico $P_W(v)$ puede ser determinada mediante su curva de potencia, que puede ser descrita mediante la siguiente expresión :

$$P_W(v) = \left\{ \begin{array}{l} 0, v < v_I \\ (W)(P(v)), v_I \leq v < v_O \\ 0, v_O < v \end{array} \right\} \quad (2.34)$$

donde v_I y v_O [m/s] son las velocidades de entrada y salida de funcionamiento del generador eóloelectrico, respectivamente (v_I es la velocidad mínima del viento que necesita el aerogenerador para operar mientras v_O es la velocidad máxima a la cual puede operar el aerogenerador sin sufrir daños, por arriba de esta velocidad el rotor se detiene), W [W] es la potencia nominal del aerogenerador, $P(v)$ es la curva normalizada con respecto a W y corresponde a un polinomio de ajuste de los datos en operación,

Para obtener la producción de energía anual de un aerogenerador E_R [Wh] con base en el análisis estadísticos de los datos de velocidad del viento se tiene:

$$E_R = K_a K_b K_c \int_{t=0}^{t=T} \int_0^{\infty} P_W(v) F(v) dv dt \quad (2.35)$$

o bien

$$E_R = (K_a K_b K_c) WT \int_{v_I}^{v_O} P(v) F(v) dv \quad (2.36)$$

donde K_a [-] es el factor de disponibilidad del aerogenerador, K_b [-] es el factor de ajuste por mantenimiento del aerogenerador, K_c [-] es el factor de ajuste por posibles fallas del aerogenerador (en la práctica es común tomar $K_a = K_b = K_c = 0.98$ para fines de cálculo), $F(v)$ es la función de

distribución de los datos de la velocidad del viento para el período de cálculo establecido como T , que comúnmente es de un año (8760 horas). Es importante resaltar que es muy común el uso de la distribución de Weibull para describir el régimen de viento y estimar así la energía eléctrica generada.

Finalmente el factor de planta F_p de un aerogenerador está dado por:

$$F_p = \frac{E_R}{E_E} = \frac{(K_a K_b K_c) W T \int_{v_I}^{V_o} P(v) F(v) dv}{W \int_{t=0}^{t=T} dt} \quad (2.37)$$

$$F_p = (K_a K_b K_c) \int_{v_I}^{V_o} P(v) F(v) dv \quad (2.38)$$

donde $E_E [Wh]$ es la cantidad de energía que produciría un aerogenerador operado a plena potencia durante el período de tiempo t correspondiente al período de los datos de velocidad del viento medidos.

2.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

El análisis de la velocidad del viento es primordial para el sistema de energía híbrido propuesto, ya que con la existencia de un buen recurso eólico se garantiza un factor de planta elevado para el generador eoloelectrico y por tanto una generación mayor por medio de energía primaria en el sistema híbrido. Para evaluar el comportamiento del sistema híbrido tomamos los datos de velocidad del viento (IIE, 2006) de tres localidades diferentes: La Venta Oax (10 y 32 m .de altura), El Cardón B.C.S. (10 y 50 m. de altura) y Chetumal Q. Roo (10 m. de altura). Según lo reportado por el IIE los datos de la velocidad del viento cumplen con la norma IEC. Cabe señalar que en el caso de Chetumal sólo contábamos con datos de velocidad de viento a una altura de 10 m. Ya que nuestro sistema considera un aerogenerador a 50 m. de altura sobre el nivel del terreno, mediante la ecuación 2.7 estimamos la velocidad del viento a dicha altura.

En la figura 2.12 se muestra, como ejemplo, la velocidad del viento obtenida durante un período de un año, con registro cada 10 minutos, para la localidad de La Venta Oax. a una altura de 32 m. Si bien, como veremos más adelante, en este trabajo para llevar a cabo el cálculo de energía que produce el aerogenerador consideramos los datos de velocidad de viento cada 10 minutos, en este apartado obtenemos la función de distribución de probabilidad de Weibull para estimar el potencial eólico de El Cardón y de Chetumal.

En las figuras 2.13, datos medidos a 10 m de altura, y en la figura 2.14, datos a 50 m. de altura, Se pueden apreciar las funciones de distribución de Weibull para la localidad de El Cardón BCS.

En la figuras 2.15 y 2.16 mostramos la distribución de Weibull de la velocidad del viento a una altura de 10 y 50 metros, para Chetumal Q Roo. Cabe señalar que en las dos localidades mencionadas casos la función de distribución de Weibull resulta una buena aproximación para estimar el recurso eólico de estos dos sitios en particular.

Para determinar los parámetros c y k de la función de distribución de Weibull para las localidades del Cardón y Chetumal aplicamos las ecuaciones 2.21 y 2.22. En la tabla 2.3 se muestran los valores de c y k así como los valores estadísticos más importantes obtenidos del recurso eólico de dichas localidades .

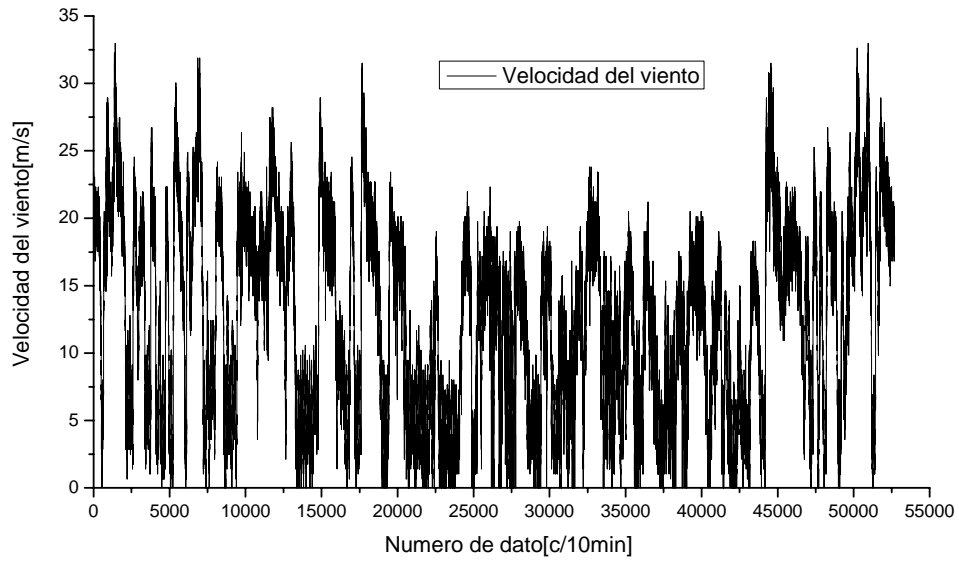


Figura 2.12: Datos de velocidad del viento en la localidad de La Venta Oax. a una altura de 32 m.

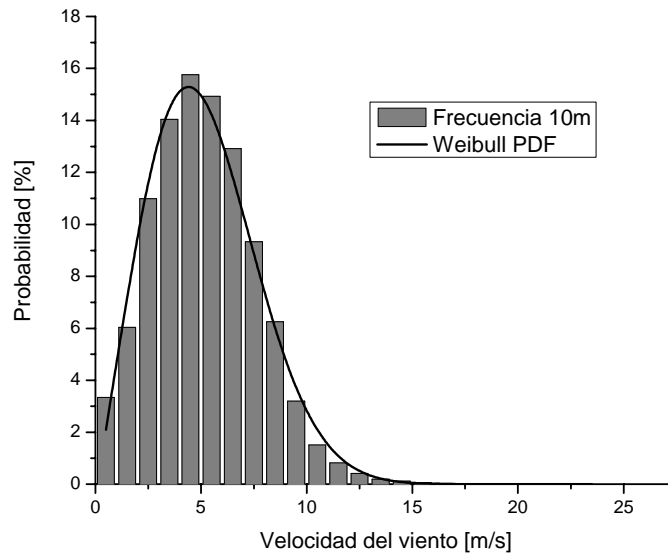


Figura 2.13: Función de distribución de Weibull para velocidades de viento a una altura de 10 m. en El cardón BCS.

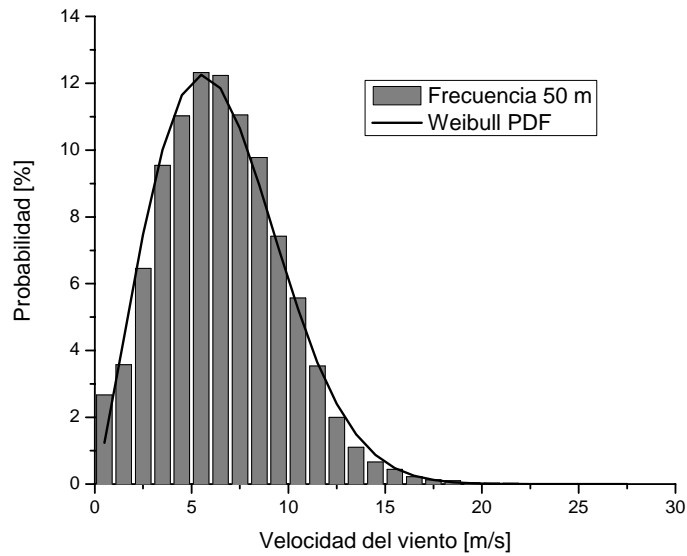


Figura 2.14: Función de distribución de Weibull para velocidades de viento a una altura de 50 m. en El Cardón BCS.

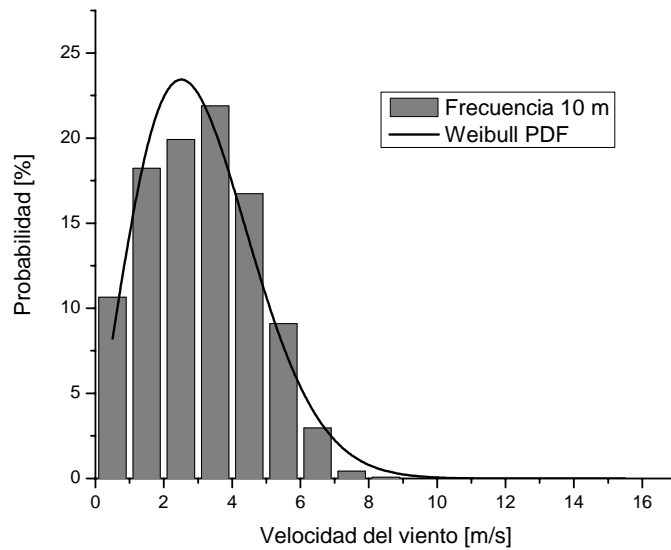


Figura 2.15: Función de distribución de Weibull para velocidades de viento a una altura de 10m en Chetumal Q. Roo.

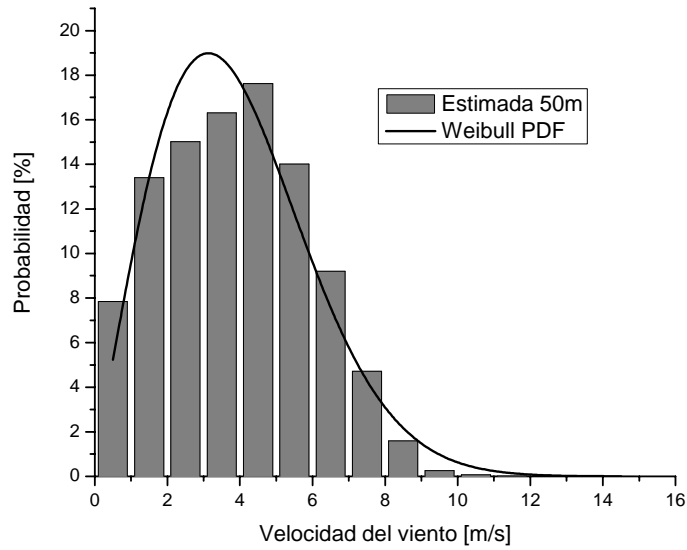


Figura 2.16: Función de distribución de Weibull para velocidades de viento a una altura de 50 m. en Chetumal Q. Roo

Localidad	Parámetros Weibull		Parámetros estadísticos	
	$c[m/s]$	$k[-]$	$\sigma[-]$	$\bar{v}[m/s]$
El Cardón 10m	5.81	2.17	2.50	5.14
El Cardón 50m	2.171	7.41	3.18	6.56
Chetumal 10m	3.46	1.99	1.61	3.07
Chetumal 50m	4.35	2.0	2.02	3.86

Tabla 2.3: Principales características del recurso eólico en las localidades de El Cardón y Chetumal

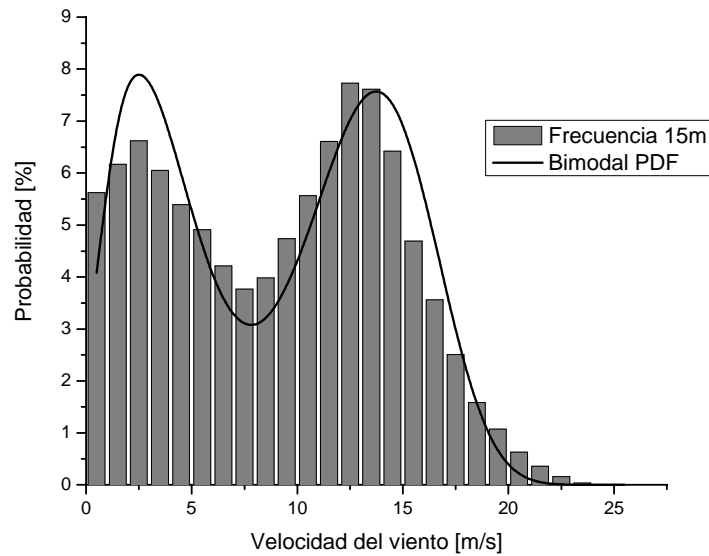


Figura 2.17: Función de distribución de Weibull & Weibull para velocidades de viento a una altura de 15 m. en La Venta Oax.

Localidad	Parámetros Bimodal				Parámetros estadísticos					
	c_1 [m/s]	c_2 [m/s]	k_1 [-]	k_2 [-]	σ_1 [-]	σ_2 [-]	σ	\bar{v}_1 [m/s]	\bar{v}_2 [m/s]	\bar{v} [m/s]
La venta 15 m.	4.10	14.37	1.68	5.16	2.24	2.94	5.42	3.66	13.21	9.11
La venta 32 m.	6.38	19.55	1.91	5.32	3.07	3.89	7.09	5.66	18.01	12.53

Tabla 2.4: Principales características del recurso eólico en la localidad de La Venta

Como hemos visto, aunque numerosos estudios alrededor del mundo han demostrado que la función de distribución de Weibull es una buena aproximación para estudiar el comportamiento del viento, en algunos sitios específicos se presenta un régimen de viento bimodal por lo que el uso de una distribución de Weibull no es lo más adecuado, este es el caso del régimen de viento de La Venta Oax, la cual presenta una función de distribución bimodal (Jaramillo y Borja, 2004). Por lo anterior, para el análisis estadístico de los datos de velocidad de viento de La Venta Oax., se recurre a una función de ese tipo (ecuaciones 2.24, 2.25, 2.27 y 2.28). En las figuras 2.17 y 2.18 mostramos la función de distribución Bimodal de La Venta Oax. a un altura de 15 y 32 m. respectivamente, en dichas figuras se observa que la distribución Bimodal es adecuada para representar el recurso eólico de esta localidad. Cabe señalar que el recurso eólico de esta localidad se compone principalmente de dos frentes de viento, el proveniente del golfo de México con dirección norte-sur y aquel que proviene de la laguna superior del Golfo de Tehuantepec con dirección sureste-noroeste.

Finalmente en la tabla 2.4 mostramos las características del recurso eólico de La Venta Oax.

En este trabajo se seleccionaron las localidades de La venta, El Cardón y Chetumal debido a que por sus características estos sitios presentan un buen, mediano y bajo recurso eólico, respectivamente, como puede verse en las tablas 2.3 y 2.4.

En este capítulo presentamos los conceptos principales relacionados con la energía eólica con

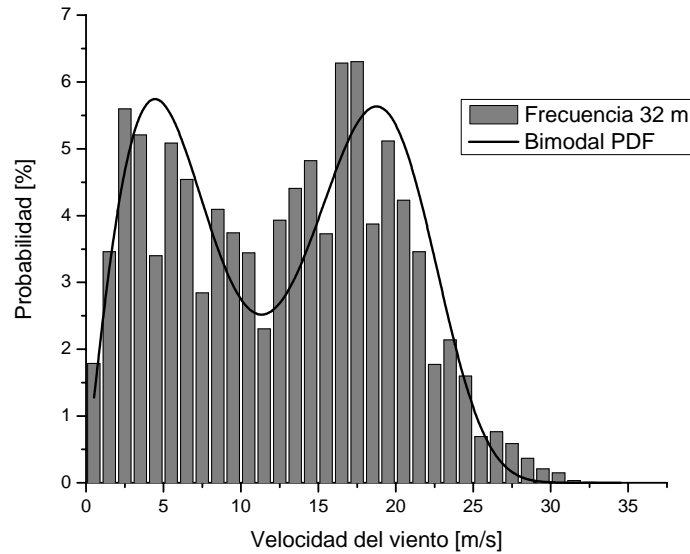


Figura 2.18: Función de distribución de Weibull & Weibull para velocidades de viento a una altura de 32 m. en La Venta Oax.

lo que proporcionamos las bases para el entendimiento del manejo, análisis y aprovechamiento del recurso eólico de un sitio dado. Estimamos el recurso eólico para las tres localidades de estudio, y determinamos las distribuciones de probabilidad y sus parámetros estadísticos.

En el siguiente capítulo veremos las características principales de los electrolizadores y las celdas de combustible, que sentará las bases para su posterior implementación en la simulación del sistema híbrido bajo diferentes regímenes de viento.

Capítulo 3

HIDRÓGENO Y CELDAS DE COMBUSTIBLE.

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro y no tóxico. Es el elemento más ligero y abundante de la naturaleza. Su densidad es de 0,0899 gr./l, es decir 14,4 veces menor que la densidad del aire. Constituye aproximadamente el 80% de la masa de toda la materia del Universo y se encuentra en el 90% de las moléculas. El Sol, por ejemplo, es casi 100% hidrógeno puro y toda la energía que nos envía proviene de la fusión de los átomos de hidrógeno.

Uno de los errores más comunes es pensar que el hidrógeno es una fuente de energía primaria como el gas o el petróleo. El hidrógeno es un vector energético, una forma secundaria de energía que se debe transformar con base otras fuentes primarias. El hidrógeno, pues, no se puede considerar un combustible primario, además, sólo cuando el hidrógeno se obtiene a partir de fuentes renovables de energía es capaz de producir un balance limpio en procesos sustentables.

La producción de hidrógeno a gran escala empezó en 1920 cuando se construyeron los primeros electrolizadores para obtener hidrógeno y oxígeno. Pero, el hidrógeno se hizo famoso por el uso que hicieron los ingenieros de los zeplines alemanes al mezclarlo en una proporción de 10:1 en una mezcla que utilizaban para el llenado de los mismos. Esta mezcla les concedía un mayor rendimiento y, por lo tanto, más velocidad. En la década de 1940, uno de los principales entusiastas en el uso del hidrógeno fue el alemán Rudolf Erren que fabricó camiones, autobuses, submarinos que utilizaban el hidrógeno y otros combustibles en motores de combustión interna. Después de la Segunda Guerra Mundial el interés el uso del hidrógeno como combustible fue de la mano del científico inglés Francis T. Bacon en los años cincuenta, que desarrolló la primera celda de hidrógeno-aire y que tendría una gran importancia en el programa espacial americano.

Sin embargo, la visión de una “economía del hidrógeno” hecho con energía solar fue propuesto en el 1962 por el electroquímico australiano John Bockris. Este científico también asesoró la General Motors y auguró que “el hidrógeno sería el combustible de todos los medios de transporte”. La era del hidrógeno, primero en la industria del espacio y, posteriormente en la automotriz había empezado.

El uso del hidrógeno como combustible no es una novedad en el mundo. Éste se ha utilizado desde hace décadas en la industria satelital, sin embargo durante la última década, debido al agotamiento de los yacimiento de hidrocarburos es algo irreversible, ha surgido un importante interés por la promoción del hidrógeno como combustible.

3.1 PRODUCCIÓN HIDRÓGENO

Actualmente en el mundo se producen más de 500,000 millones de metros cúbicos de hidrógeno, de los cuales la mayoría se utiliza por la industria química para la obtención de fertilizantes y para la hidrogenación de aceites orgánicos comestibles. Existen alrededor de 90 métodos para producir hidrógeno que pueden ser divididos en 4 categorías: biológicos, químicos, electroquímicos y térmicos (Winter, 1988). El proceso más común para producir hidrógeno es mediante la reformación de hidrocarburos (principalmente gas natural) aunque durante el proceso de obtención se generan contaminantes como el dióxido de carbono. Además, la producción del hidrógeno a partir de la materia primaria de hidrocarburos necesita de importantes cantidades de energía, por lo que hace a este método inviable para ser un proceso sustentable, es aquí donde entra el uso de energía renovable para producir hidrógeno. El hidrógeno puede ser producido sin ninguna emisión de dióxido de carbono a partir de sistemas renovables de energía, en donde dicha energía renovable se utilice en la electrólisis del agua, la cual consiste en la ruptura de la molécula de agua a través de electricidad. Reacciones de óxido-reducción ocurren en los electrodos y se generan hidrógeno y oxígeno como productos. El oxígeno e hidrógeno obtenidos por electrólisis pueden utilizarse como combustible en una celda de combustible y así garantizar un proceso eficiente y limpio.

3.2 CELDAS DE COMBUSTIBLE

Actualmente los hidrocarburos son las fuentes principales de energía de las cuales dependemos en gran medida, sin embargo el agotamiento de estos recursos naturales es algo irreversible, por lo cual se ha buscado el desarrollo de las fuentes renovables de energía con la finalidad de llevar a cabo la sustitución de las fuentes convencionales de energía.

Durante la última década ha surgido un importante interés por la promoción de las llamadas celdas de combustible. Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica (Cano, 1999). La reacción química se lleva a cabo combinando hidrógeno y oxígeno sin ninguna combustión. Las celdas de combustible son similares, en funcionamiento, a las baterías que producen corriente directa (CD), pero a diferencia de éstas una celda de combustible no se agota ni se recarga ya que producirán electricidad y calor en tanto se les provea de combustible.

3.2.1 FUNDAMENTOS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.

Una celda de combustible básica está formada por un capa de electrolito que se encuentra en contacto con un cátodo y un ánodo en cada uno de sus extremos como se muestra en la figura 3.1.

La primera demostración de la operación de una celda de combustible fue realizada por el científico Willian Grove en el año 1839 (Fundación Terra, 2003). El principio fue descubierto accidentalmente, mientras hacía un experimento de electrólisis. Cuando desconectó la batería de la electrólisis observó una corriente que fluía en dirección opuesta y que consumía los gases de hidrógeno y oxígeno a la cual llamó “batería de gas”. Esta batería de gas consistía en unos electrodos de platino en un baño de ácido sulfúrico disuelto.

Por tanto otra manera de entender a las celdas de combustibles es considerando que en ellas el hidrógeno es quemado en la reacción simple (Larminie y Dicks, 2001):

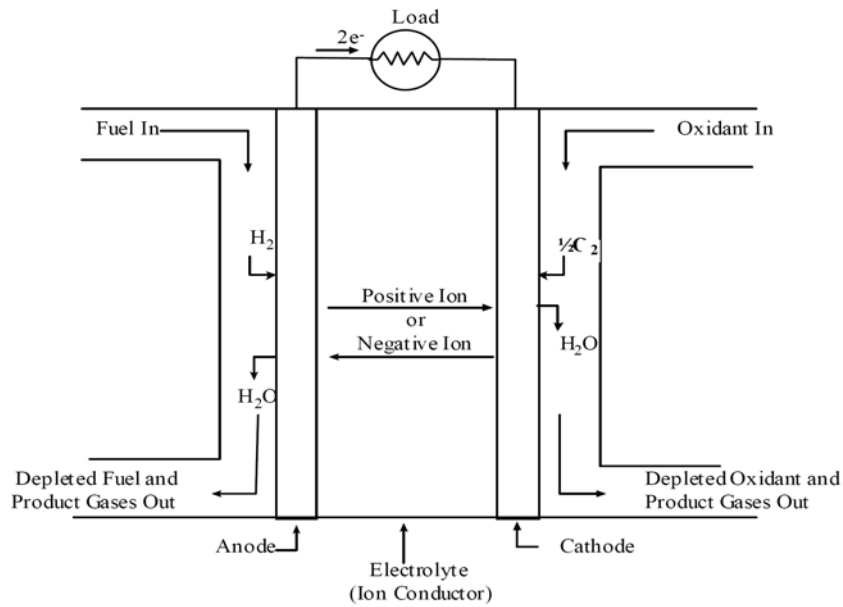
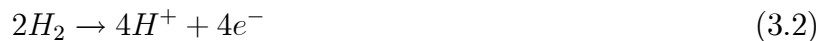


Figura 3.1: Esquema básico de una celda de combustible. (Adaptado de EG and G Technical Services, Inc., 2004)



Sin embargo en esta reacción en lugar de liberar energía calorífica, se produce energía eléctrica. Para comprender como la separación del agua en hidrógeno y oxígeno produce una corriente eléctrica es necesario considerar las reacciones que tiene lugar en cada uno de los electrodos de la celda de combustible, esto varía dependiendo del tipo de celda de combustible, por lo que en esta sección mostraremos las reacciones presentes en las celdas denominadas de electrolito ácido que es del tipo de la utilizada por Grove. En el ánodo de una celda de combustible de electrolito ácido el hidrógeno ioniza, liberando electrones y creando iones H⁺ (protones), así el balance de cargas del hidrógeno es:



La reacción dada por la ecuación 3.2 libera energía, mientras tanto en el cátodo el oxígeno reacciona con los electrones tomados del electrodo y con los iones H⁺ del electrolito para formar agua, esto es:



3.2.2 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE.

Aunque existen diversas maneras de clasificar las celdas de combustibles, las clasificaciones más comunes se realizan con base en su temperatura de operación y por el tipo de electrolito. En cuanto

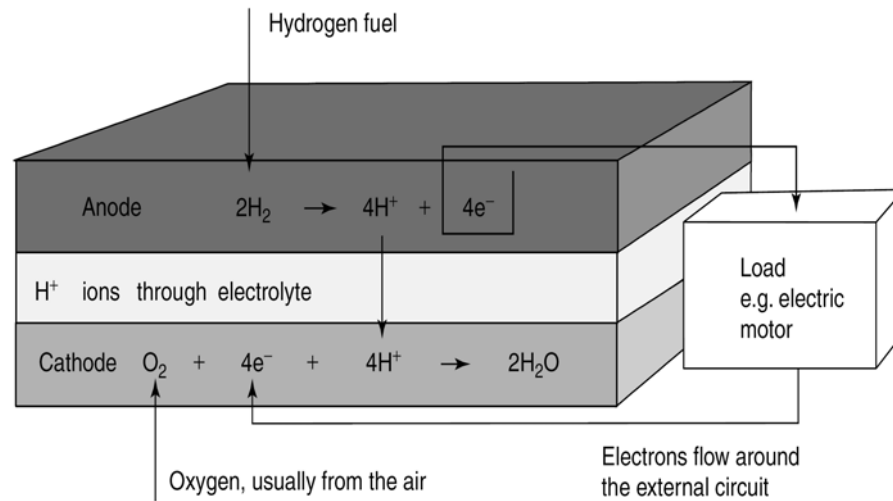


Figura 3.2: Reacción en los electrodos y flujo de carga para una celda de combustible de electrolito ácido. (Tomado de Larminie y Dicks, 2003).

a la temperatura de operación, se puede hablar de celdas de combustible de alta temperatura, cuya temperatura de operación es mayor a $200\text{ }^\circ\text{C}$, y las celdas de combustible de baja temperatura, cuya temperatura de operación es menor a $200\text{ }^\circ\text{C}$ (Cano, 1999). Una diferencia derivada de la temperatura de operación es el empleo de diferentes materiales, principalmente electrolitos ya que a temperaturas elevadas debe ser utilizarse electrólitos no acuosos.

A continuación presentamos una breve descripción de las celdas de combustible clasificadas por el tipo de electrolito que usan (DOD, 2006):

a) Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico.(PEMFC, de sus siglas en inglés *Proton Exchange Membrane Fuel cell*). También denominadas celdas de combustible de membrana intercambiadora de protones. Estas celdas desarrollan alta densidad de potencia y ofrecen ventajas tales como bajo peso y volumen, comparado con otras celdas. Las celdas tipo PEM usan un polímero sólido como electrolito y electrodos de carbón poroso que contienen un catalizador. Sólo requieren para su funcionamiento hidrógeno, oxígeno del aire y agua, por lo cual no existen problemas de corrosión. Este tipo de celdas utilizan como combustible hidrógeno tomado de tanques de almacenamiento o de reformadores.

Las celdas tipo PEM operan a bajas temperaturas, menos de $80\text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturas de operación bajas permiten un encendido rápido y menor tiempo para llegar a su temperatura de operación, lo que resulta en un menor desgaste de los componentes del sistema y en consecuencia una mayor durabilidad. Sin embargo las celdas tipo PEM requieren un catalizador metálico, usualmente platino, para separar los protones y neutrones del hidrógeno lo que aumenta el costo de estos sistemas.

b) Celdas de Combustible Alcalinas.(AFC, de sus siglas en inglés *Alkaline Fuel Cell*). El electrolito en las AFC operadas a alta temperatura ($\sim 250\text{ }^\circ\text{C}$) es KOH en alta concentración (85 % en peso), mientras que en la operación a bajas temperaturas se utiliza KOH a baja concentración (35-50 % en peso) El electrolito está contenido en una matriz de asbesto, mientras que los electrocatalizadores pueden ser Ni, Ag, óxidos metálicos, etc.

Celda de combustible	Reacción en el ánodo	Reacción en el cátodo
PEMFC/PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Alcalina	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
Carbonato molten	$H_2 + CO_3^- \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^- \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^-$
Oxido solido	$H_2 + O^= \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^= \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O^= \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^=$

Tabla 3.1: Reacción electroquímica en las celdas de combustible. Adaptado de EG and G Technical Services, Inc., 2004.

c) Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC, de sus siglas en inglés *Phosphoric Acid Fuel Cell*). En estas celdas se usa ácido fosfórico concentrado al 100% es usado como electrolito en, la cual opera en un rango entre 150 y 220 °C A temperaturas más bajas el ácido fosfórico es un mal conductor de iones. La estabilidad del ácido fosfórico concentrado es alta comparada con otros ácidos comunes por lo que las PAFC a temperaturas relativamente altas (100 a 220 °C) ofrecen mayor eficiencia y además el uso de ácido fosfórico concentrado (100 %) minimiza la presión del vapor de agua. La matriz generalmente utilizada para retener el ácido fosfórico es carburo de silicón, mientras que los electrocatalizadores en el ánodo y cátodo son de Platino.

d) Celdas de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC, de sus siglas en inglés *Molten Carbonate Fuel Cell*). En ese tipo de celdas el electrolito es generalmente una combinación de carbonatos alcalinos que se encuentra contenida en una matriz de $LiAlO_2$. Las MCFC operan en un rango de 600 a 700 °C, rango en el cual los carbonatos alcalinos forman una sal fundida altamente conductiva, que proporciona la conducción iónica. Debido a las altas temperaturas de operación de las MCFCs, normalmente se utilizan Ni (en el ánodo) y NiO (en el cátodo) en los catalizadores.

e) Celdas de Combustible de Oxido Sólido (SOFC, de sus siglas en inglés *Solid Oxide fuel Cell*). El electrolito en este tipo de celdas es sólido no poroso oxido metálico, normalmente $Y_2O_3-ZrO_2$. Una SOFC opera a una temperatura de 1000 °C, a la cual la conducción iónica de los iones de oxígeno se lleva a cabo. El ánodo normalmente esta formado or Co-Zr o Ni-ZrO2 mientras que el ánodo está constituido por Sr-LaMnO3.

3.2.3 VENTAJAS DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLES

Las celdas de combustibles presentan grandes ventajas como son:

- Alta Eficiencia. las celdas de combustible son más eficientes que las máquinas de combustión interna en la conversión de energía química en generación de potencia.
- Simplicidad. Las celdas de combustibles son bastante simples, no tienen partes móviles lo que repercute en un alta confiabilidad y durabilidad.
- Bajas emisiones. Como se presenta la conversión directa de energía (no hay combustión) las celdas de combustibles son muy limpias. El agua es el principal producto de la reacción en una celda de combustible, por lo que éstas puede ser calificadas como "cero emisiones".
- Silenciosas, ya que no presentan partes móviles
- Operación en sitios remotos y sin necesidad de operador.

Ahora bien la principal desventaja de las celdas de combustible es su costo, aunque éste ha bajado en el transcurso de los últimos años.

Es necesario apuntar que el punto a) anterior se basa en el estudio de una celda de combustible bajo el concepto de la Primera Ley de la termodinámica. Ahora bien, si se considera un análisis general de exergía se facilita la comparación del desempeño teórico de una máquina térmica y una celda de combustible. Un análisis de exergía muestra que las celdas de combustible y las máquinas de térmicas tienen la limitante establecida por la Segunda Ley de la termodinámica, independientemente de la especificación de los materiales utilizados o sus configuraciones. La eficiencia de Carnot es una manifestación de segunda ley de la termodinámica para la máquina térmica excluyendo el proceso de combustión. Sin embargo cabe señalar que la segunda ley también restringe el proceso de combustión al igual que ocurre en la conversión llevada a cabo en la celda de combustible. Para llevar a cabo una comparación entre una máquina térmica y una celda de combustible es necesario establecer un análisis de exergía basado en la Segunda Ley, como se muestra en el trabajo reportado por (Wright, 2004)

3.3 ELECTROLIZADORES

En este trabajo se simula la producción de hidrógeno mediante un electrolizador, el cual es un dispositivo que convierte agua, via electrólisis en hidrógeno y oxígeno. Se pueden considerar a los electrolizadores como equipos opuestos a las celdas de combustibles, ya que éstas en lugar de separar el agua en sus componentes mediante aplicación de electricidad, generan electricidad teniendo como "residuo" principal agua. Así, la electrólisis del agua es un proceso en el cual el agua se rompe en hidrógeno y oxígeno a través de la aplicación de la energía eléctrica (ver figura 3.3). La reacción global de este proceso está dada por:



Un electrolizador está conformado por un ánodo (polo positivo), un cátodo (polo negativo), un electrolito y una entrada de energía (HFC, 2007).

Los electrolizadores con tecnología más comprobada, utilizan una solución alcalina o bien membranas de intercambio de protones como electrolito.

Los electrolizadores alcalinos usan una solución acuosa de KOH como medio de transporte iónico (Aprea, 2005). La reacción química que se presenta en un electrolizador alcalino en el cátodo es:



mientras que en el ánodo:



La reacción global es la expresada en la ecuación 3.4. En la figura 3.4 mostramos de manera simplificada el proceso que se lleva a cabo en un electrolizador para la obtención de hidrógeno.

Ahora bien los electrolizadores que utilizan una membrana de intercambio de protones requieren un electrolito no líquido, lo cual simplifica el diseño significativamente. El electrolito es una membrana polimérica ácida. La reacción que se lleva a cabo en el ánodo está dada por:



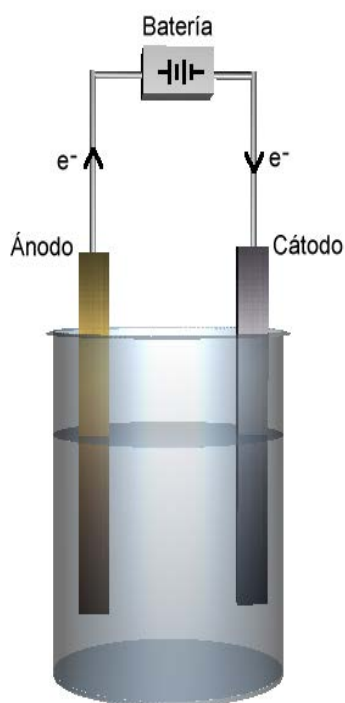


Figura 3.3: Diagrama simplificado de la electrólisis del agua (Adaptado de www.wikipedia.org)

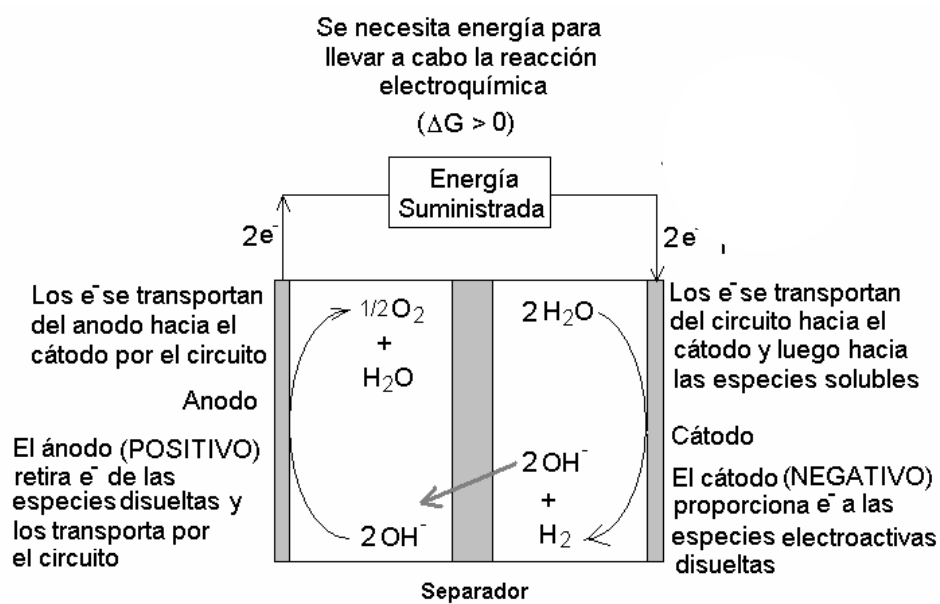


Figura 3.4: Reacciones en un electrolizador (adaptado de Sandoval,2006).

y en el cátodo por:



En este capítulo, se presentaron los fundamentos de las celdas de combustibles y electrolizadores, los tipos principales que existen y las reacciones principales que en ellas se llevan a cabo, lo anterior con la finalidad de conocer su funcionamiento y forma de operación.

En el siguiente capítulo realizamos la integración de los componentes sistema híbrido para poder realizar la simulación del mismo en los estudios de caso correspondientes a tres localidades con diferentes potenciales eólicos.

Capítulo 4

SISTEMA HÍBRIDO

En este capítulo presentamos las características del sistema de energía híbrido, así como los parámetros de operación del sistema. Los componentes principales del sistema de energía híbrido son: Un aerogenerador, un sistema de celda de combustible, un electrolizador para la generación de hidrogeno y un tanque de almacenamiento. Todos estos subsistemas se simularán en el software Simulink para la evaluación integral del sistema. Además, se determinará la configuración óptima de los componentes para satisfacer una carga eléctrica. Los resultados de dicha simulación serán utilizados posteriormente para obtener el costo nivelado de producción de electricidad.

4.1 PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

El sistema de energía híbrido presenta los siguientes parámetros de operación:

1) La fuente primaria de energía será la energía eólica que es transformada en electricidad mediante el generador eoloeléctrico.

2) La energía eléctrica generada por el aerogenerador se suministrará de manera directa a la carga, cuando ésta así la requiera.

3) Cuando exista un superávit de producción eléctrica del aerogenerador con respecto a la carga, debido a las condiciones de la velocidad del viento, el aerogenerador proveerá dicho superávit hacia el electrolizador para generar hidrógeno.

4) Cuando exista un déficit de producción eléctrica del generador eoloeléctrico con respecto a la carga, debido a las condiciones de la velocidad del viento, dicho déficit de energía eléctrica será provisto por la celda de combustible, la cuál tomará el hidrógeno previamente producido por el electrolizador.

5) En la simulación, el intervalo de tiempo en que se realizará la comparación entre la energía generada por el aerogenerador y la demandada por la carga será cada 10 minutos. Ésto corresponde a los datos anemométricos de las tres localidades seleccionadas como estudios de caso

En la figura 4.1 se muestra la configuración general para la modelación del sistema híbrido. En esta figura se observa que los datos de velocidad del viento son incluidos en el módulo del aerogenerador para estimar la energía. Dicha energía es comparada con el módulo que contiene los datos de la carga eléctrica a ser suministrada mediante el módulo del sistema de control. Cuando el sistema de control determina que existe un superávit de producción en relación con la carga, enruta este superávit al electrolizador, en cambio, si se presenta un déficit de energía eléctrica se envía una señal a la celda de combustible para generar energía suficiente que permita satisfacer a la carga.

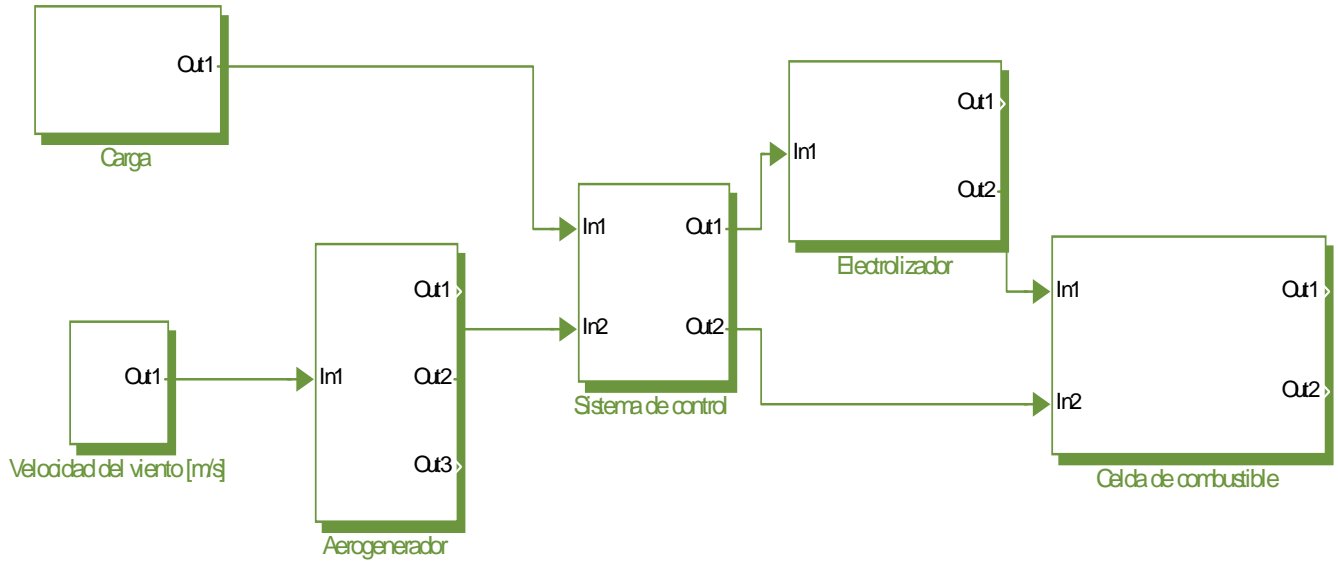


Figura 4.1: Diagrama general del sistema híbrido en simulink.

4.2 GENERADOR EOLOELÉCTRICO

El aerogenerador es la fuente de energía primaria del sistema híbrido. Como se ha mencionado, un aerogenerador convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica, esta conversión de energía depende primordialmente de la tecnología empleada. La curva de potencia de un aerogenerador representa la relación de la generación de potencia eléctrica con respecto a la velocidad del viento. En este trabajo se modeló la curva de potencia de aerogeneradores de diferentes potencias nominales obteniéndose una ecuación polinómica (ecuación 4.1) que describe el comportamiento del aerogenerador en función de la velocidad del viento. La ecuación polinómica utilizada en las simulaciones está dada por:

$$P_W(v) = \left\{ W \left[C + \frac{A}{B\sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-0.5z^2} \left(1 + \frac{a^3}{3}y(y^2 - 3) + \frac{a^4}{4}(y^4 - 6y^3 + 3) \right) + \frac{10a_3^2}{6}(y^6 - 15y^4 - 15) \right\} \right] \right\}, v_I \leq v < v_O \quad (4.1)$$

donde

$$y = \frac{v - x_c}{B},$$

$P_W(v)[W]$ es la potencia del aerogenerador como función de la velocidad del viento, $C[-]$, A , B , x_c , $a_3, a_4[m/s]$ son parámetros de ajuste que dependen del aerogenerador que se este analizando, $v[m/s]$ es la velocidad del viento y $W[W]$ es la potencia nominal del aerogenerador. En la figura 4.2 se muestra el comportamiento de un aerogenerador de 2500 W de potencia nominal en función de la velocidad del viento y los valores ajustado mediante la ecuación 4.1.

La ecuación 4.1 fue implementada en Simulink para evaluar la producción de energía eléctrica considerando varios aerogeneradores. La figura 4.3 muestra el bloque general de programación del

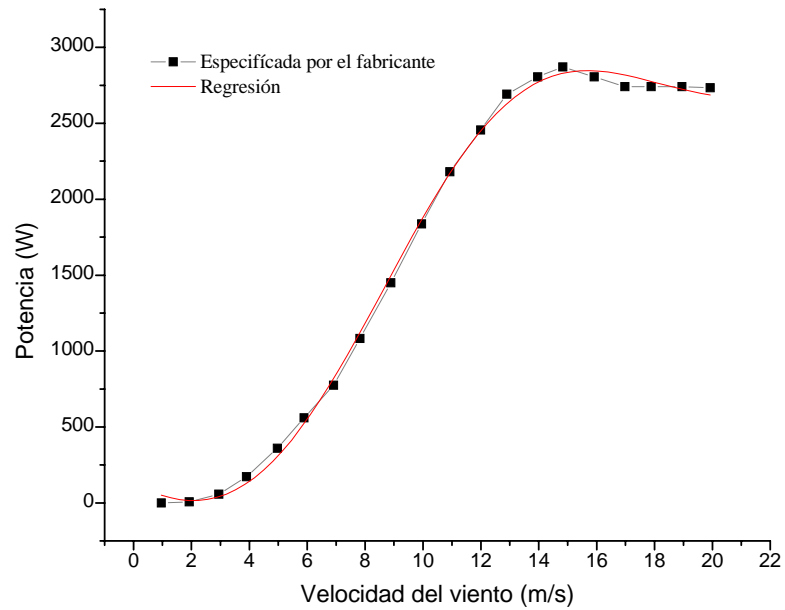


Figura 4.2: Regresión polinómica de la curva de potencia de un generador eólico de 2500 W con regulación stall.

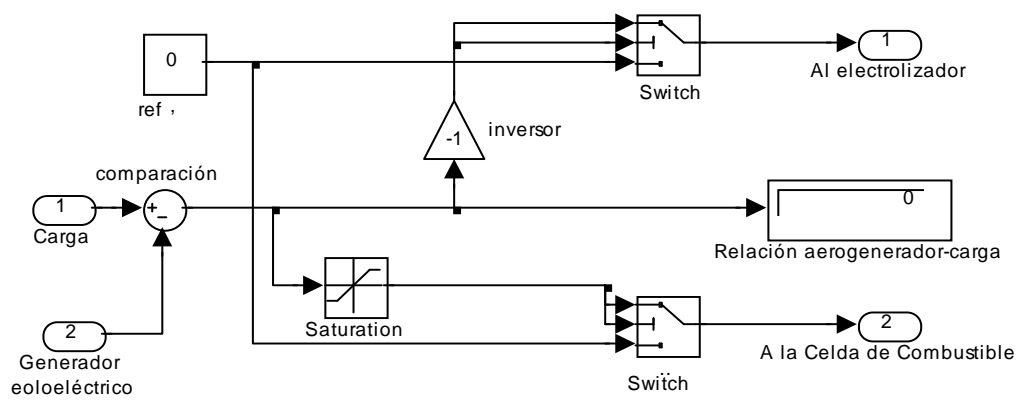


Figura 4.3: Bloque del generador eólico (con entradas y salidas) en Simulink.

aerogenerador con sus entradas y salidas respectivas. Los datos de entrada del módulo del aerogenerador están relacionados con el recurso eólico, es decir, los datos anemométricos de la localidad a evaluar. La salida del módulo del aerogenerador, que es la energía generada, corresponde con los datos de entrada del bloque del sistema de control. Cabe señalar que en el ambiente de programación en Simulink se pueden establecer múltiples salidas que permiten representar en tiempo real diferentes parámetros del comportamiento del aerogenerador, como son: producción de energía instantánea, energía mensual, gráficas de generación eléctrica entre otros.

4.3 SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control es la parte del sistema donde se realiza la evaluación de la energía producida por el aerogenerador para posteriormente compararla con la energía requerida por la carga y de esta manera determinar si existe superávit o déficit de electricidad. En caso de existir superávit de electricidad, el sistema de control activa el módulo del electrolizador para la producción de hidrógeno; en caso de existir déficit, el sistema de control indica a la celda de combustible generar la electricidad faltante a partir del hidrógeno producido previamente para satisfacer el consumo. La figura 4.4 representa el diagrama correspondiente al sistema de control utilizado en la simulación. En el bloque denominado *comparación*, se determina si existe superávit o déficit de producción de electricidad del aerogenerador en relación a la carga, sea cual sea el resultado numérico de esta operación, este valor es enviado hacia el bloque llamado *saturation*, que sólo permiten el paso de datos positivos enviando la señal para que opere la celda de combustible, En el caso de que la señal del bloque *comparacion* sea negativa pase la ceda no operará y la señal será tomada por el *inversor* para llegar al electrolizador. Después del bloque *inversor* y *saturation* los bloques permiten el encendido o apagado del electrolizador y la celda de combustible de combustible.

4.4 ELECTROLIZADOR

La electroproducción de hidrógeno y oxígeno en moles es función del tiempo y puede expresarse de acuerdo a la ley de Faraday como:

$$m = \frac{It}{nF}, \quad (4.2)$$

donde $I[A]$ es la corriente aplicada, $t[s]$ es el tiempo, $n[-]$ es el número de electrones y $F[96485 C/mol]$ es la constante de Faraday. Al sustituir valores, las expresiones teóricas (ecuaciones 4.3 y 4.4) para evaluar la producción de hidrógeno y oxígeno respectivamente son (Sapru et al., 1997):

$$m_{H_2} = \frac{I}{2F} = 5.18 \times 10^{-6} I \quad (4.3)$$

$$m_{O_2} = \frac{I}{4F} = 2.59 \times 10^{-6} I, \quad (4.4)$$

donde m_{H_2} y $m_{O_2}[mol/seg]$ es la producción de hidrógeno y oxígeno respectivamente. Combinando las ecuaciones 4.3 y 4.4 con la ecuación de los gases ideales, obtenemos una expresión que nos

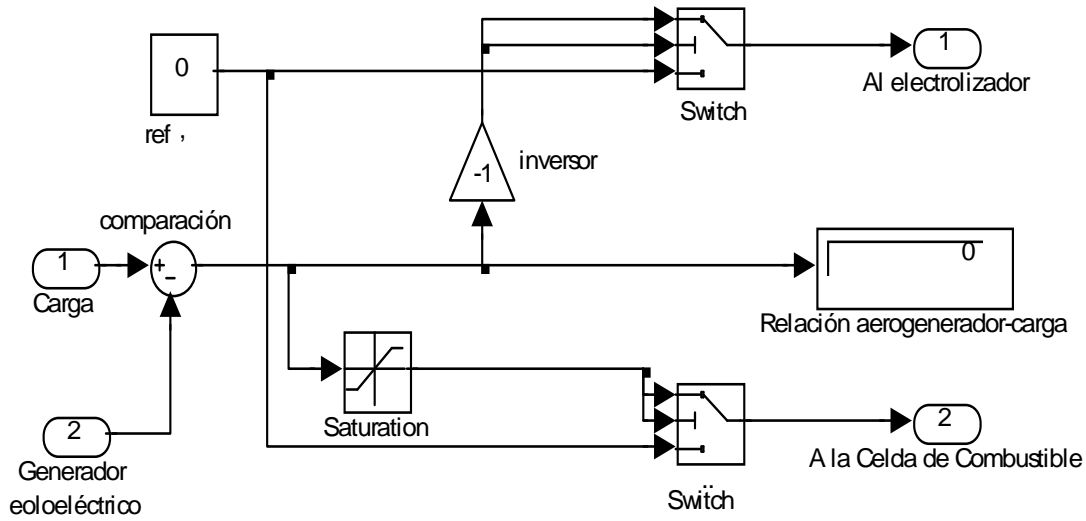


Figura 4.4: Sistema de control. Determina si existe superávit o déficit de la producción del aerogenerador con respecto a la carga.

permite evaluar el volumen de hidrógeno y oxígeno generado como una función de la carga aplicada al electrolizador (Sandoval, 2006).

$$V_{H_2} = \frac{IRT}{2PF}, \quad (4.5)$$

donde V_{H_2} es el volumen de hidrógeno producido por unidad de tiempo, $R[0.08205 \text{ l.atm/mol.K}]$ es la constante universal de los gases, $T[K]$ es la temperatura, y $P[atm]$ es la presión. Análogamente para el determinar la producción de oxígeno tenemos:

$$V_{O_2} = \frac{IRT}{4PF}, \quad (4.6)$$

donde V_{O_2} es el volumen de oxígeno producido por unidad de tiempo mediante la electrólisis del agua en el electrolizador. Al suponer condiciones estandar, al sustituir valores y obteniendo la tasa de producción por unidad de tiempo de la ecuación 4.5 :

$$V_{H_2} = \frac{I(0.08205 \text{ l.atm/mol.K}(298K))}{2(1 \text{ atm})(96485 \text{ C/mol})} = 1.26708 \times 10^{-4} I \quad (4.7)$$

y para el oxígeno.

$$V_{O_2} = \frac{I(0.08205 \text{ atm/mol.K}(298K))}{4(1 \text{ atm})(96485 \text{ C/mol})} = 6.33541 \times 10^{-5} I. \quad (4.8)$$

La ecuación 4.7 es la ecuación que se considera para realizar la simulación del electrolizador en el sistema de energía híbrido. Dicha ecuación se representa en el ambiente de programación como se

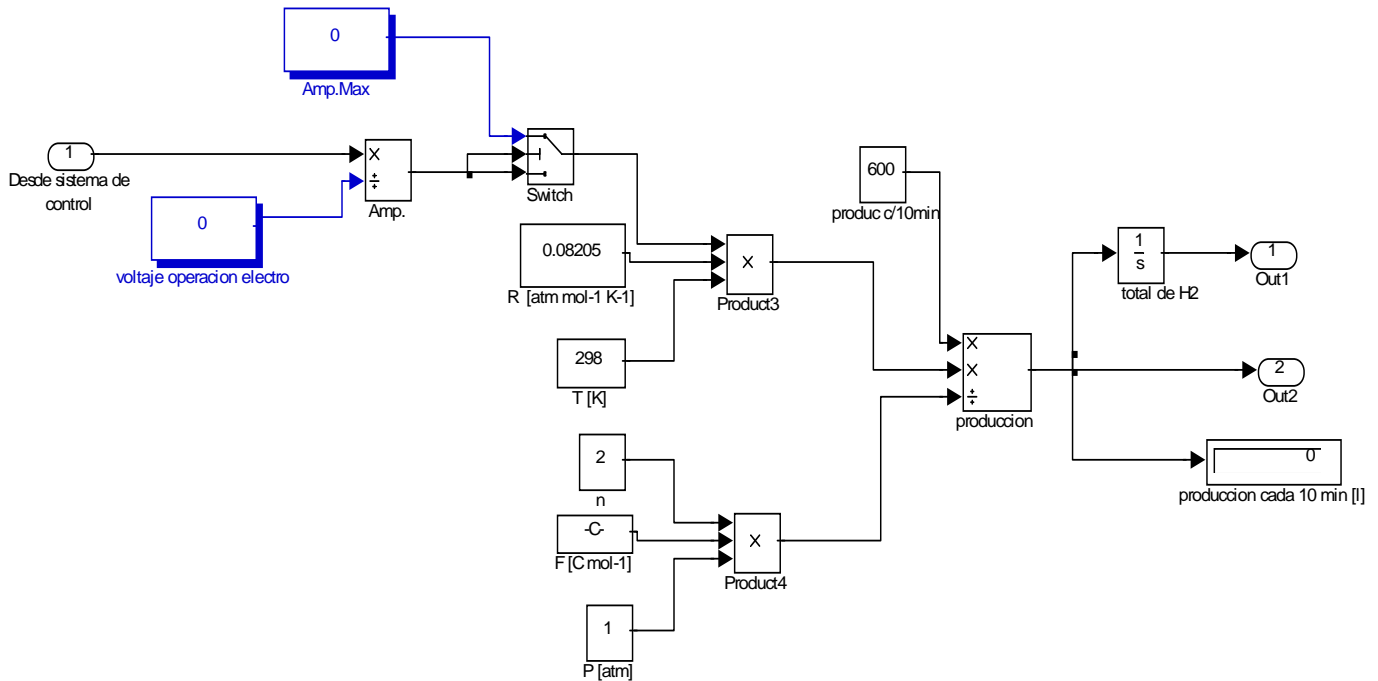


Figura 4.5: Representación del electrolizador en la simulación.

indica en la figura 4.5. El bloque *Amp* determina el valor de la corriente que ingresa al electrolizador, mientras que el bloque *Switch* garantiza que el electrolizador no se sobrecargue ya que limita la corriente que recibe su máximo de operación (determinado por el bloque *Amp max*).

4.5 CELDA DE COMBUSTIBLE

El subsistema de celda de combustibles es el que provee a la carga con energía eléctrica cuando por falta de recurso eólico, el aerogenerador no puede satisfacerla por si mismo. Para la implementación en Simulink del subsistema de celda de combustible se considera la siguiente expresión.

$$C_{carga} = I = 2F \times H_{2usado} . \quad (4.9)$$

Para obtener el hidrógeno que demanda la celda combustible para generar la corriente que se suministra a la carga, se tiene la siguiente relación:

$$H_{2usado} = \frac{In_c}{2F}, \quad (4.10)$$

donde $H_{2usado}[moles.s^{-1}]$ es el hidrógeno utilizado por la celda de combustible, $n_c[-]$ es el número de celdas que conforman el apilamiento de la celda de combustible. Para llevar a cabo la simulación se consideran celdas de combustibles comerciales en donde no es común que se exprese el número de celdas en los datos de placa, por lo que expresamos la ecuación 4.10 en términos de la potencia de operación de la celda P_c tal que:

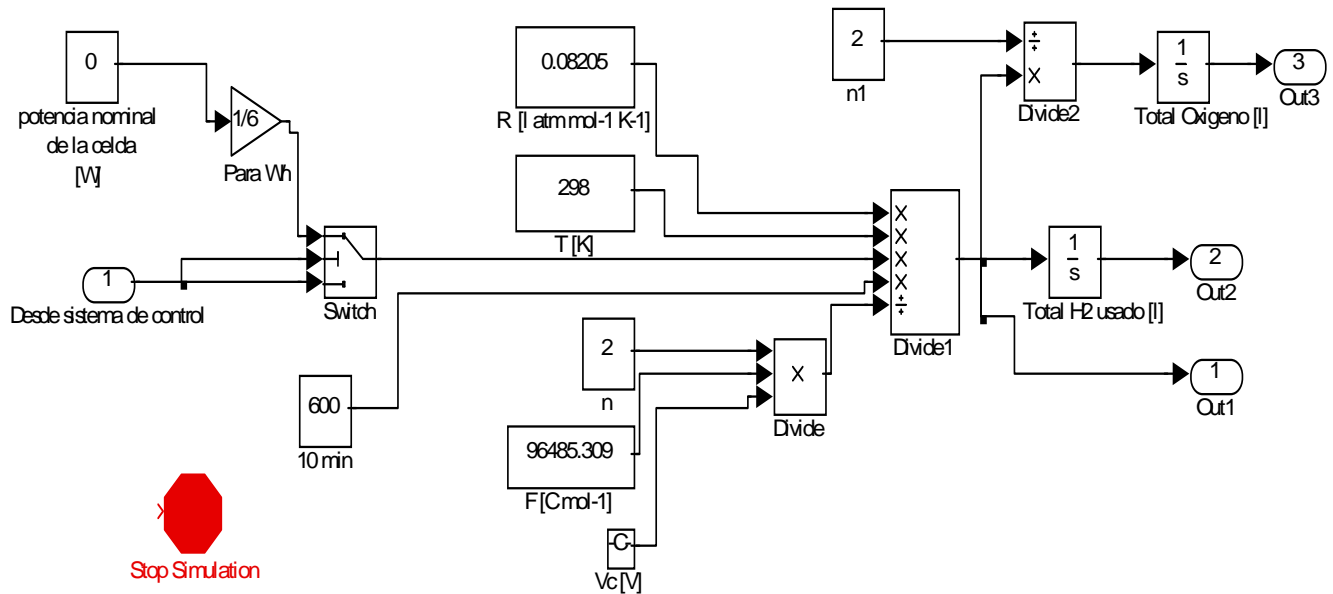


Figura 4.6: Diagrama de la celda de combustible en Simulink.

$$P_c = V_c \times I \times n_c, \quad (4.11)$$

donde $V_c[v]$ es el voltaje aplicado a cada celda, sí por alguna razón no se cuenta con el valor de V_c , el valor de 0.65 volts puede ser usado como una buena aproximación (Larminie, 2000). Al obtener I de la ecuación 4.11 y sustituir en la ecuación 4.10 podemos escribir:

$$H_{2usado} = \frac{P_c}{2V_cF}, \quad (4.12)$$

y para determinar la cantidad de hidrógeno en litros por segundo se tiene:

$$H_{2litros} = \frac{P_cRT}{2PFV_c}. \quad (4.13)$$

En la figura 4.6 se muestra el diagrama en Simulink de la celda de combustible. Al igual que en electrolizador, el bloque *Switch* limita la potencia de la celda de combustible a la potencia máxima de operación de la misma.

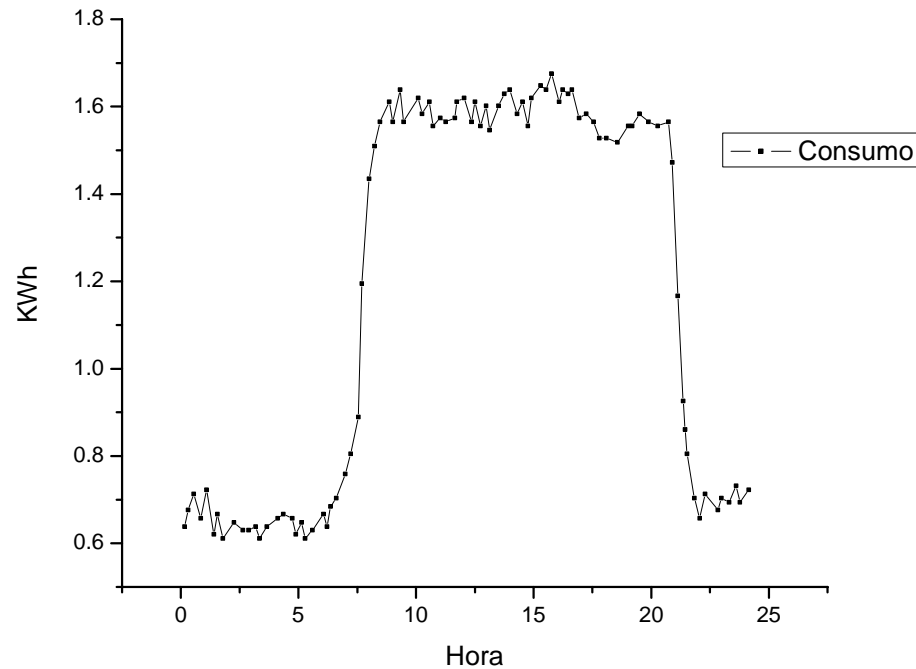


Figura 4.7: Curva de consumo a satisfacer (Adaptado de Ramos y Fiscal, 1999).

4.6 CARGA

El sistema híbrido tiene como finalidad satisfacer la demanda de energía de una carga eléctrica. Como modelo de dicha demanda consideramos la curva de consumo de un establecimiento que presenta demanda de energía eléctrica todo el día (Ramos, 1999). Además para la implementación del sistema híbrido que satisface la carga se considera un factor de potencia de 0.95. Este establecimiento presenta consumo por iluminación y cuenta con diversos aparatos eléctricos como aire acondicionado, refrigeración, etc. El comportamiento diario de la demanda de energía se muestra en la figura 4.7:

Los datos de la curva de consumo mostrados en la figura 4.7 fueron implementados considerando su proyección anual para la implementación de la modelación del sistema híbrido.

4.7 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Para la realización de la simulación del sistema híbrido es importante apuntar que la operación de dicho sistema se analiza en un período anual ininterrumpido, así mismo se hicieron múltiples ejecuciones del programa tomando en cuenta diferentes capacidades en las componentes del sistema con la idea de obtener la combinación óptima que permitiera su operación autónoma.

En la simulación se garantiza que el nivel de hidrógeno almacenado nunca fuera cero, ya que tal situación implicaría no contar con hidrógeno disponible para operar la celda, lo que daría como resultado no satisfacer la demanda de la carga. Un punto que debe ser considerado es no sobredimensionar

el sistema híbrido para las necesidades de la carga pues implicaría el aumento de los costos.

Un ejemplo de sobredimensionamiento del sistema híbrido se muestra en la figura 4.8. Se consideró para la localidad de La Venta Oaxaca un sistema híbrido con las siguientes capacidades:

- a) Aerogenerador: 3700 W a 32m de altura
- b) Electrolizador: 1000W
- c) Celda de Combustible: 1000W

En la gráfica 4.8 a) se muestra la producción de energía del aerogenerador, en la 4.8 b) se indica el valor de la carga eléctrica a satisfacer, en la gráfica 4.8 c) se observa el comportamiento de la producción de hidrógeno cada diez minutos, en la gráfica 4.8 d) se describe el consumo de hidrógeno cada 10 minutos y por último en la grafica 4.8 e) se reporta la acumulación de hidrógeno. En esta última gráfica se observa que el hidrógeno acumulado sobrepasa las necesidades del sistema, para satisfacer la carga, a pesar de garantizar que el sistema híbrido puede funcionar de manera autónoma.

Ahora bien, al simular el sistema se puede caer en el subdimensionamiento del sistema, donde la producción de hidrógeno no es la suficiente para satisfacer la demanda de la carga eléctrica. Como ejemplo de ésto, en la figura 4.9 se muestra la evaluación del sistema para La Venta Oaxaca. con los siguientes componentes:

- a) Aerogenerador: 1800 W a 32 m de altura.
- b) Electrolizador: 1000 W.
- c) Celda de Combustible: 1000W.

Como puede verse en la gráfica 4.9 e), alrededor del dato 32000 el valor del hidrógeno acumulado es menor que cero, lo que indica que el sistema híbrido no cuenta con hidrógeno almacenado y la carga deja de operar.

Se debe notar que el valor de la potencia de la celda de combustible para los dos casos presentados (sobredimensionado y subdimensionado), es el mismo. Esto es debido a que la celda de combustible debe proveer a la carga la misma potencia instantánea que es de aproximadamente 900 W.

Para calcular la potencia nominal mínima necesaria del aerogenerador más adecuado para operar en el sistema híbrido para los diferentes sitios de estudio debe tomarse en cuenta que:

La energía total demandada por la carga debe ser entregada por el aerogenerador. El sistema de almacenamiento de hidrógeno, la celda de combustible y el electrolizador sólo permiten llevar a cabo la distribución de energía en función del comportamiento de la carga cuando ésta no empata con la potencia del aerogenerador.

Por lo cual el balance energético del sistema está dado por:

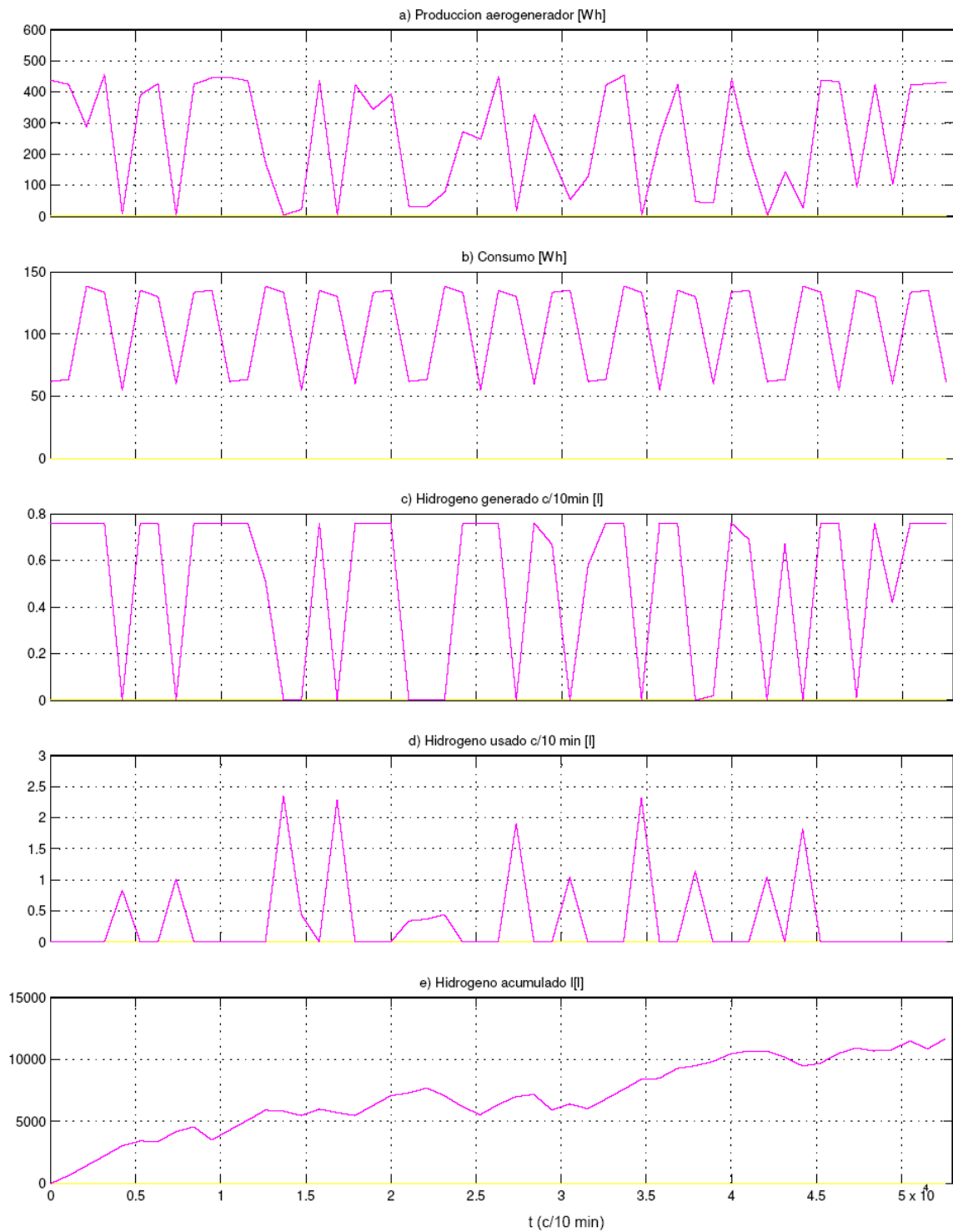
$$E_c = W(Fp)(\eta_{ECC})(t), \quad (4.14)$$

donde $E_c[Wh]$ es la energía de la carga en un tiempo dado, $W[W]$ es la potencia nominal del aerogenerador, $Fp[-]$ es el factor de planta, η_{ECC} es la eficiencia de conversión del electrolizador y la celda de combustible y $t[h]$ es el tiempo.

Entonces, para obtener el valor de W y considerando $\eta_{ECC} = 0.30$ (NREL, 2004) y $t = 8760h$ escribimos:

$$W = \frac{E_c}{2649.9Fp_A}. \quad (4.15)$$

Para determinar E_c realizamos en Simulink una evaluación de la energía total demandada por la carga, para la obtención de Fp consideramos la ecuación 2.38 y el polinomio de ajuste 4.1. Los resultados se muestran en la tabla 4.1



Time offset: 0

Figura 4.8: Sobredimensionamiento del sistema híbrido para La Venta Oax.

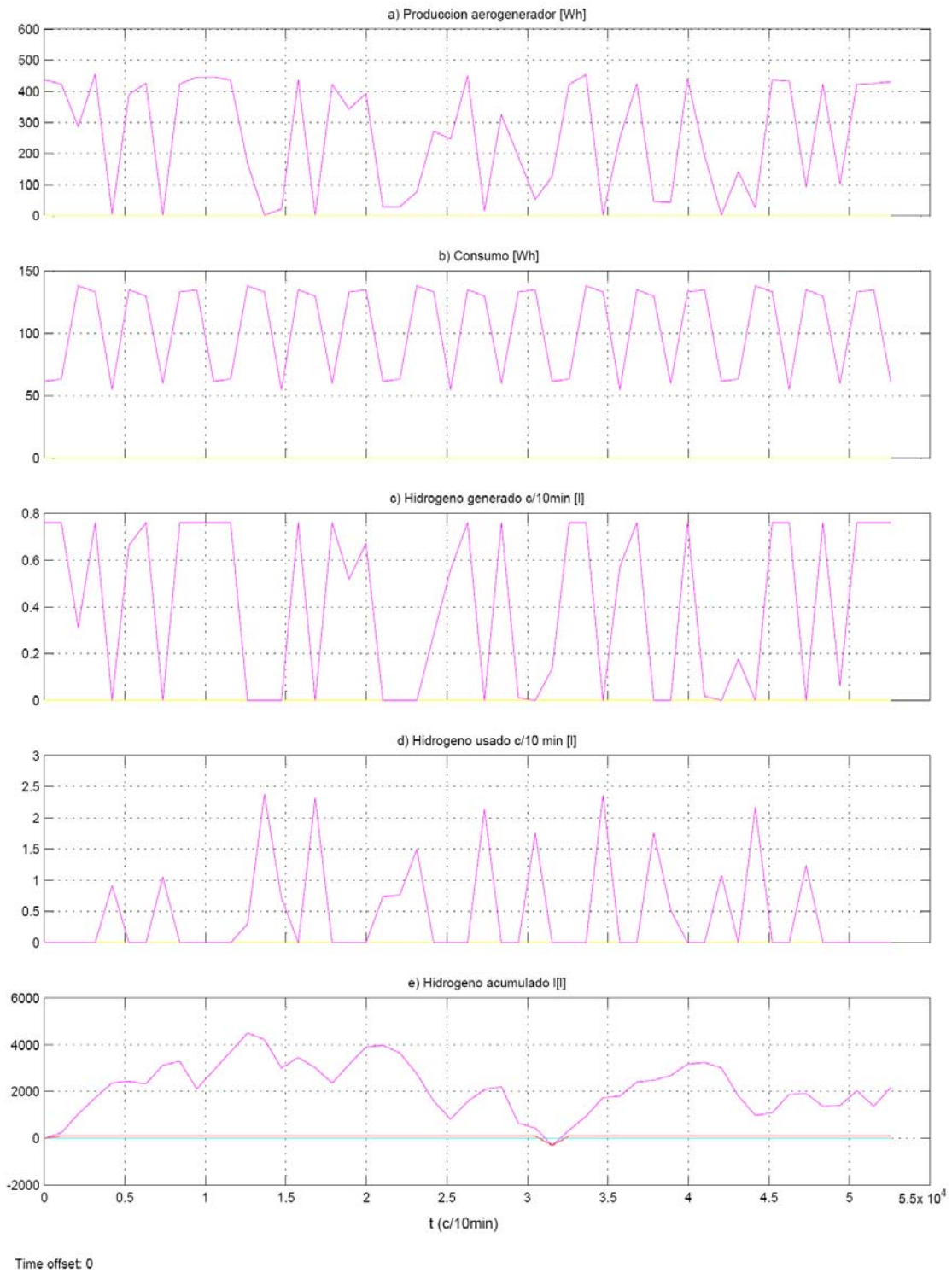


Figura 4.9: Subdimensionamiento del sistema híbrido para La Venta Oax.

Localidad	E_c	Generación ideal (E_E)	Generación real (E_R)	$Fp[-]$	W
La Venta	5.14 <i>MWh</i>	21.9 <i>MWh</i>	15.33 <i>MWh</i>	0.60	3232 W
El Cardón	5.14 <i>MWh</i>	21.9 <i>MWh</i>	7.74 <i>MWh</i>	0.35	5541 W
Chetumal	5.14 <i>MWh</i>	21.9 <i>MWh</i>	2.35 <i>MWh</i>	0.10	19396 W

Tabla 4.1: Factor de planta anual del aerogenerador por localidad

Equipo	Capacidad óptima
Aerogenerador	3700 W
Electrolizador	600 W
Celda de Combustible	1000 W
Tanque de almacenamiento	100 l

Tabla 4.2: Capacidad óptima de los elementos del sistema híbrido para La Venta Oax.

Es necesario mencionar que al considerar las potencias nominales de los aerogeneradores que actualmente se disponen en el mercado de 600, 2500, 6000, 15000 W es necesario seleccionar alguno o la combinación de ellos con base en la potencia nominal calculada.

En las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 mostramos los resultados de la simulación para la configuración óptima del sistema híbrido La Venta Oax., El Cardón BCS. y Chetumal Q Roo respectivamente y en la tabla 4.2, 4.3 y 4.4 mostramos los componentes para la configuración del sistema híbrido. Es necesario aclarar que para las localidades de La Venta y El Cardón las simulaciones se iniciaron en aquellos meses donde el recurso eólico era abundante. En los incisos e) de cada una de las gráficas 4.10, 4.11 y 4.12 se observa el comportamiento del almacenamiento de hidrógeno en el tanque que permite la operación autónoma del sistema durante todo el año sin interrupción de suministro a la carga año, la diferencia entre esas 2 líneas es el hidrógeno que podría ser retirado del sistema, sin merma en el comportamiento de éste, para su aprovechamiento en otras actividades.

Para una mejor visualización de la operación del sistema híbrido obsérvese la figura 4.10 en el valor de $t = 10,000$, en ese instante, la producción de energía del aerogenerador (figura 4.10 a) es mayor que la energía consumida por la carga (figura 4.10 b), por lo tanto este punto corresponde a superavit y es utilizado para la producción de hidrógeno (figura 4.10 c), la celda de combustible no está en operación y el hidrógeno utilizado es cero (figura 4.10 d) con lo cual el valor del hidrógeno acumulado aumenta (figura 4.10 e).

Ahora bien si nos situamos alrededor de $t = 30,000$ observamos que la energía que produce el aerogenerador (figura 4.10 a) es menor que la que consume la carga (figura 4.10 b) por lo tanto la generación de hidrógeno cesa (figura 4.10 c) y el consumo de hidrógeno aumenta por la demanda de la celda de combustible para satisfacer la carga (figura 4.10 d) lo que se refleja en una disminución del hidrógeno acumulado (figura 4.10 e).

Equipo	Capacidad óptima
Aerogenerador	6000 W
Electrolizador	1000 W
Celda de Combustible	1000 W
Tanque de almacenamiento	300 L

Tabla 4.3: Capacidad óptima de los elementos del sistema híbrido para El Cardón BCS.

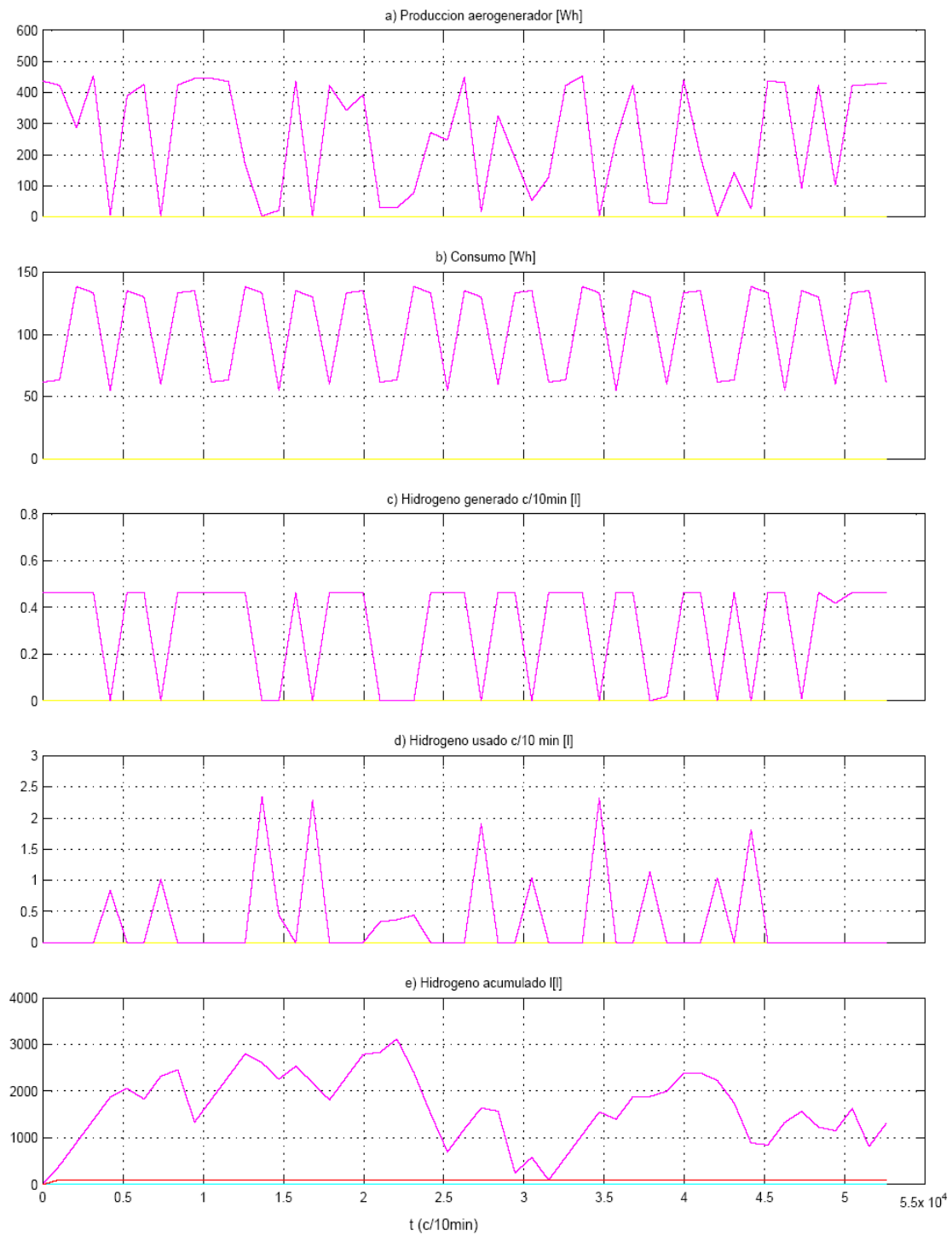


Figura 4.10: Resultado de la simulación para La Venta Oaxaca.

Figura 4.11: Resultado de la simulación para El Cardón BCS.

Figura 4.12: Resultado de la simulación para Chetumal Q. Roo.

Equipo	Capacidad óptima
Aerogenerador	21000 W
Electrolizador	1000 W
Celda de Combustible	1000 W
Tanque de almacenamiento	700 l

Tabla 4.4: Capacidad óptima de los elementos del sistema híbrido para Chetumal Q. Roo.

Localidad	H₂ Generado [l]	H₂ usado[l]
La Venta	17440	16140
El Cardón	24604	16960
Chetumal	22430	18280

Tabla 4.5: Generación y uso de hidrógeno en el sistema híbrido

En la tabla 4.5 mostramos los valores totales obtenidos tanto en la generación de hidrógeno por el electrolizador como el hidrógeno utilizado por la celda de combustible durante la operación del sistema híbrido para un año.

En este apartado hallamos la configuración óptima del sistema híbrido para cada una de las localidades tomadas como estudio de caso, los datos de estas consideraciones serán utilizados en el capítulo siguiente para determinar el Costo Nivelado de Producción de electricidad.

Capítulo 5

COSTO NIVELADO DE PRODUCCIÓN

El Costo Nivelado de Producción de electricidad es un indicador internacional que muestra el costo asociado a la generación eléctrica durante el periodo de operación del sistema completo. Este indicador considera el tiempo de vida total estimado del sistema, la energía total de salida obtenida y la tasa de retorno en términos reales (IEA, 1994). El Costo Nivelado de Producción está dado por:

$$CNP = \frac{CT}{\sum_{t=1}^n PAE_t(1+r)^{-t}}, \quad (5.1)$$

donde $n[-]$ es el número de años del período de vida del sistema, $PAE[kWh]$ es la producción anual de energía durante el tiempo t , $CT[USD]$ es el valor presente del costo total del sistema híbrido, y se calcula a través de la expresión:

$$CT = I + \sum_{t=1}^n (OM_t + CS_t)(1+r)^{-t} - VS(1+r)^{-n}, \quad (5.2)$$

donde $I[USD]$ es el costo de inversión total, $OM[USD]$ representa el costo de operación y mantenimiento durante el año t , $CS[USD]$ es el costo social durante el año t , $VS[USD]$ es el valor de salvamento después de los años de operación n y $r[\%]$ es la tasa de interés, dada en términos reales, la cual puede ser definida como la relación en que la tasa nominal a excede la tasa de inflación i , es decir:

$$1 + r = \frac{1 + a}{1 + i}. \quad (5.3)$$

Es importante mencionar que el cálculo de CNP es obtenido bajo las siguientes condiciones:

- Los costos de inversión no incluyen los intereses generados durante la construcción.
- Los costos de operación y mantenimiento OM son considerados con un incremento anual.
- El valor de salvamento aplica inmediatamente después del último año de operación.
- Los costos sociales SC no son considerados en este estudio ya que actualmente en México no existe programas de apoyo económico para las fuentes renovables de energía.

Para aplicar la ecuación 5.1 se consideró un costo de operación y mantenimiento $OM = 1\%$ de la inversión inicial y éste se incrementa el 1% anualmente por cada año de operación y además se consideró un período de vida de $n = 5$ años

Equipo	Costo de inversión
Aerogenerador	975-1,300 USD/kW
Celda de Combustible y Electrolizador	7,500-10,000 USD/kW
Almacenamiento	7.5 USD/1

Tabla 5.1: Costos de inversión por tecnología

Localidad	$F_p[-]$	CNP[USD/kWh]
Chetumal	0.10	5.13
El Cardón	0.35	0.99
La Venta	0.60	0.34

Tabla 5.2: Costos Nivelados y Factor de Planta de los estudios de caso.

Los costos de inversión para los diferentes elementos del sistema híbrido se muestran en la tabla 5.1. Se indica el intervalo de valores de mercado para cada uno de los elementos que componen el sistema híbrido

Considerando un costo promedio para el aerogenerador así como para el sistema de hidrógeno, aplicamos la ecuación 5.1 para determinar el CNP para cada una de las localidades donde se evaluó el sistema híbrido. Estos resultados se muestran en la tabla 5.2. Se observa claramente que un F_p alto repercute en un menor CNP y viceversa, aunque es claro también que el comportamiento es altamente no lineal (ver tabla 5.2).

Para hallar la relación que rige dicho comportamiento consideramos primeramente que el Costo Nivelado de Producción de electricidad como función del factor de planta

$$CNP = f(F_p), \quad (5.4)$$

Ahora escribimos el valor presente del costo total del sistema híbrido tal que:

$$CT = I + KI, \quad (5.5)$$

donde el segundo sumando del lado derecho de la ecuación (5.5) incluye el costo de operación y mantenimiento OM , el costo social CS , y el valor de salvamento VS que son una fracción K del costo de inversión total I .

El costo de inversión total I se obtiene del costo del aerogenerador C_W [USD] y del costo del electrolizador C_E [USD] que incluye el costo del sistema de almacenamiento, ambos costos son inversamente proporcionales al factor de planta, el costo de la celda de combustible C_C [USD] sólo depende de la carga. De tal suerte al reescribir la ecuación 5.5

$$CT = I(1 + K). \quad (5.6)$$

$$CT = \left(\frac{1}{F_p} B_1 C_W + \frac{1}{F_p} B_2 C_E + B_3 C_C \right) (1 + K), \quad (5.7)$$

donde se han incluido las constantes B_1 , B_2 y B_3 como constantes de proporcionalidad. Al reagrupar

$x = \frac{1}{F_p}$	$CNP[USD/kWh]$
10	5.13
2.86	0.99
1.66	0.34

Tabla 5.3: Relación entre el inverso del F_p y el CNP

las constantes de proporcionalidad podemos reescribir la ecuación (5.7) como:

$$\begin{aligned}
 CT &= \frac{1}{F_p} (B_1 C_W + B_2 C_E + K B_1 C_W + K B_2 C_E) + (B_3 C_C + K B_3 C_C). \\
 CT &= \frac{1}{F_p} D_1 + D_2.
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Por otro lado en el denominador del Costo Nivelado de Producción de electricidad (ecuación 5.1) podemos establecer que la Producción Anual de Energía PAE es directamente proporcional al factor de planta, esto es:

$$\sum_{t=1}^n PAE_t (1+r)^{-t} = D_3 F_p. \tag{5.9}$$

Con base en las relaciones anteriores 5.8 y 5.9 reescribimos la ecuación 5.1 como función del factor de planta de la forma:

$$CNP = \frac{\frac{1}{F_p} D_1 + D_2}{D_3 F_p}, \tag{5.10}$$

Al agrupar constantes tenemos que:

$$CNP = \frac{C_1}{F_p^2} + \frac{C_2}{F_p} \tag{5.11}$$

Al considerar el cambio de variable de la forma:

$$\frac{1}{F_p} = x, \tag{5.12}$$

podemos escribir el polinomio de segundo grado de la forma:

$$CNP = C_1 x^2 + C_2 x + C_3, \tag{5.13}$$

donde se ha considerado la constante C_3 como la constante de ajuste para un sola curva de todas las posibles familias de curvas. En la tabla 5.3 mostramos la relación entre x y el CNP .

Las constantes C_1 , C_2 y C_3 se determinaron mediante el método de mínimos cuadrados, Y al sustituirlos en la ecuación 5.13 tenemos:

$$CNP = 0.00403x^2 + 0.52776x - 0.5508. \tag{5.14}$$

Al sustituir la relación 5.13 en la ecuación 5.14 obtenemos:

$$CNP = 0.00403 \left(\frac{1}{F_p} \right)^2 + 0.52776 \left(\frac{1}{F_p} \right) - 0.5508. \tag{5.15}$$

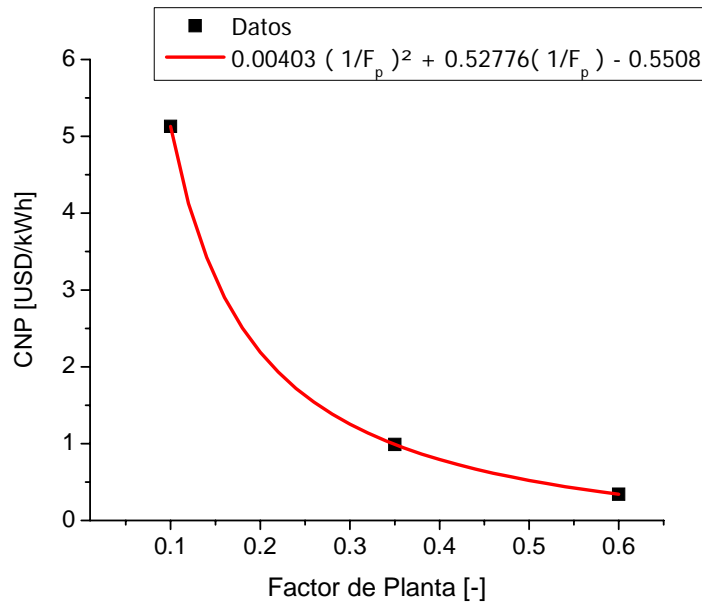


Figura 5.1: Datos calculados y modelo para el cálculo del CNP como función del Factor de Planta.

La ecuación 5.15 es válida para el intervalo $0.1 \leq F_p \leq 0.6$, que es la gama de factores de planta que es posible encontrar para los diferentes emplazamientos en el mundo.

En la figura (5.1) se muestran los datos del Costo Nivelado de Producción y la curva de regresión obtenida mediante la ecuación 5.15.

Para el estudio de caso de La Venta Oaxaca, donde el factor de planta es de 0.6, en la figura 5.2 se muestra la sensibilidad del *CNP* ante la variación del costo de inversión del sistema de hidrógeno (celda de combustible y electrolizador) de 7,500 a 10,000 USD/kW instalado y se fija el costo del aerogenerador en su costo de inversión máximo que es de 1,300 USD/kW instalado. En la figura 5.3 se considera ahora la variación del costo del aerogenerador en el rango de 975 a 1300 USD/kW instalado fijando el costo del sistema de hidrógeno en 10,000 USD/kW. Como se observa al comparar las figuras 5.2 y 5.3 se observa que el *CNP* presenta una mayor sensibilidad al costo de inversión del sistema de hidrógeno que al costo de inversión del aerogenerador.

Análogamente al caso anterior se efectuó el estudio de sensibilidad y la estimación del *CNP* para los estudios de caso de El cardón BCS. y Chetumal Q. Roo. En las figuras 5.4 y 5.5 se muestran los resultados para El Cardón, mientras que en las figuras 5.6 y 5.7 se muestra el resultado para Chetumal.

Con base en lo anterior puede verse que el caso con mayor factibilidad técnico-económica corresponde a La Venta Oaxaca.

El *CNP* de electricidad por medios fotovoltaicos con almacenamiento en baterías se encuentra entre 0.8 y 1.2 USD/kWh dependiendo de las condiciones de insolación (NREL, 2002). Por lo tanto un sistema híbrido conformado por un aerogenerador y sistema de hidrógeno con almacenamiento resulta competitivo para factores de planta mayores que $F_p \geq 0.32$. Algunos estudios desarrollados por el Instituto de Investigaciones Eléctricas muestran que en la República Mexicana existen localidades

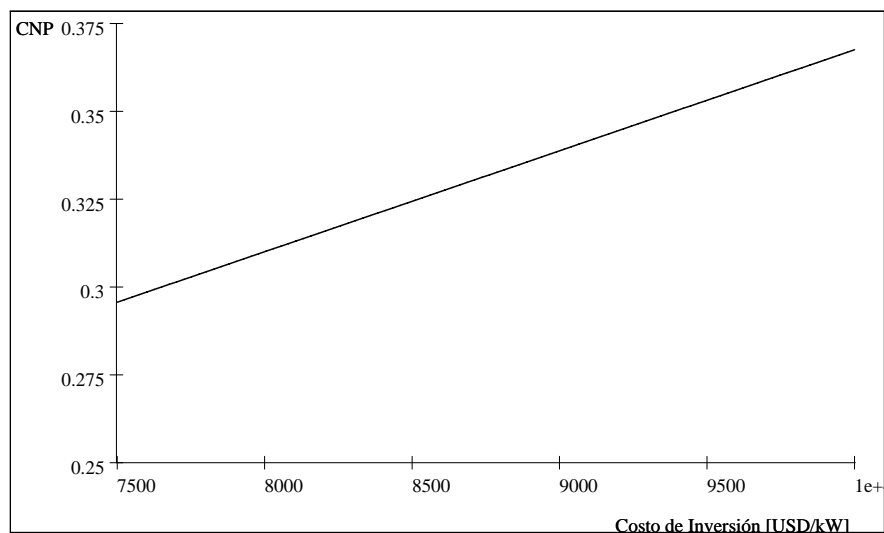


Figura 5.2: Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para La Venta Oax tomando una tasa de interés del 10% y variando el costo del sistema de hidrógeno.

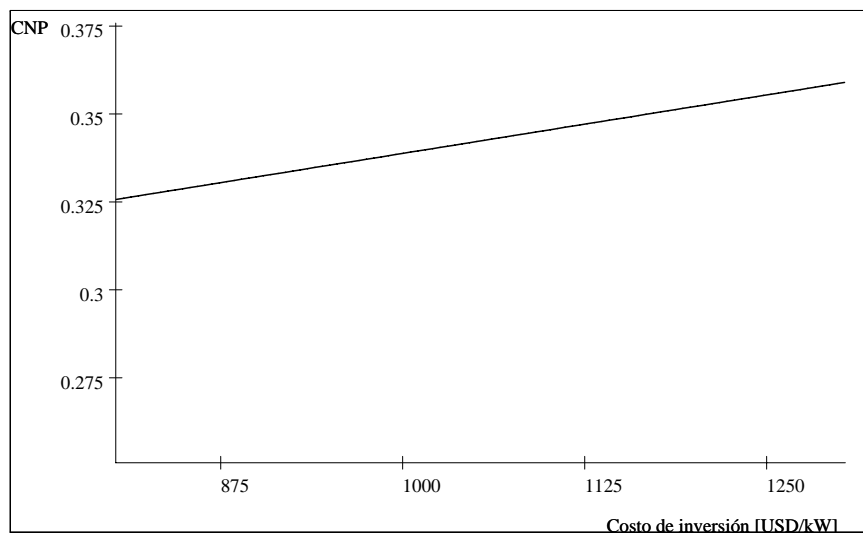


Figura 5.3: Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para La Venta Oax tomando una tasa de interés del 10% y variando el costo del aerogenerador.

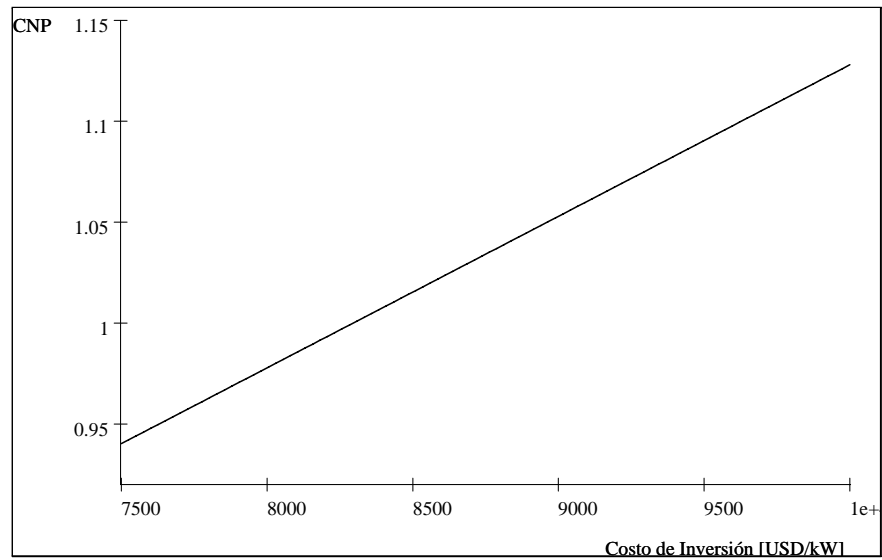


Figura 5.4: Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para El Cardón BCS. tomando una tasa de interés del 10% y variando el costo del sistema de hidrógeno.

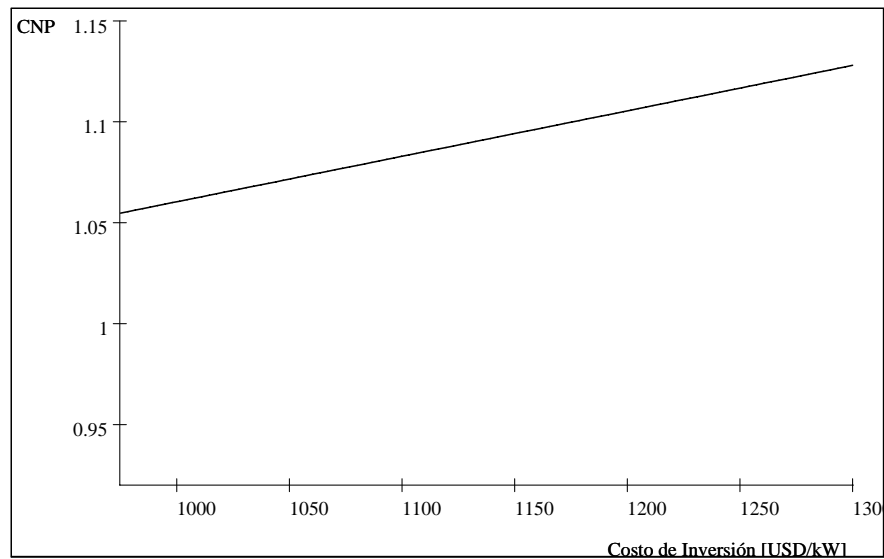


Figura 5.5: Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para El Cardón BCS. tomando una tasa de interés del 10% y variando el costo del aerogenerador.

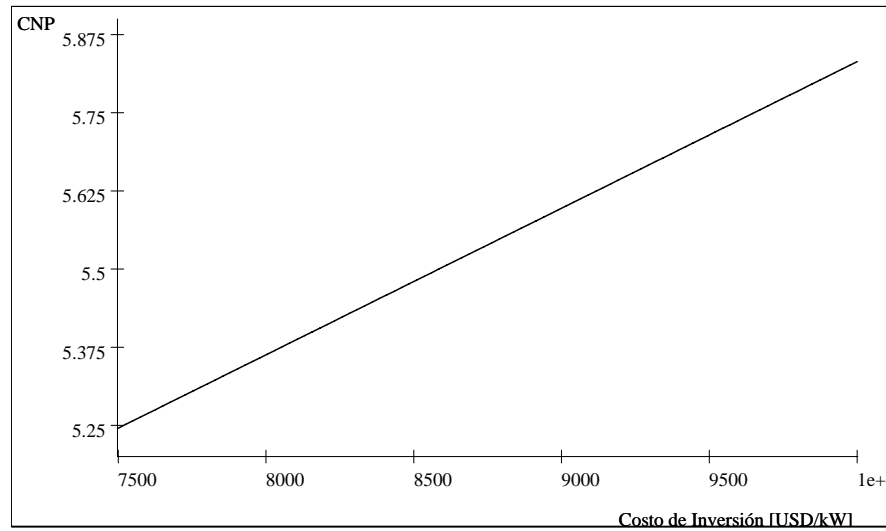


Figura 5.6: Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para Chetumal Q. Roo tomando una tasa de interés del 10 % y variando el costo del sistema de hidrógeno.

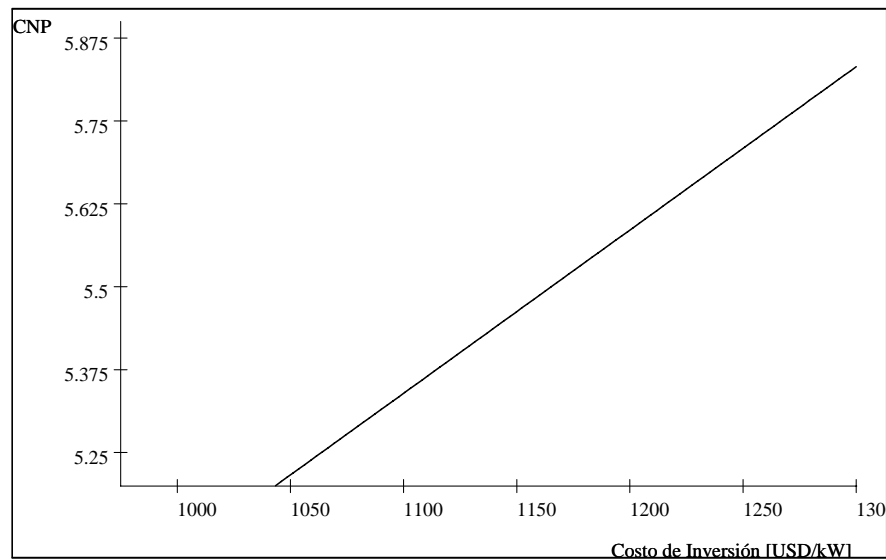


Figura 5.7: Costo Nivelado de Producción (CNP[USD/kWh]) para Chetumal Q. Roo tomando una tasa de interés del 10% y variando el costo del aerogenerador

que presentan factores de planta $Fp \geq 0.32$ como Zacatecas, Veracruz, Tamaulipas, entre otros, donde el sistema híbrido es competitivo con sistemas fotovoltaicos autónomos con almacenamiento de energía.

El estudio de sensibilidad muestra que se requiere abatir costos principalmente en el sistema de hidrógeno para aumentar la competitividad de esta tecnología.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se evaluó el recurso eólico de las tres localidades tomadas como estudios de caso del sistema híbrido : La Venta en Oaxaca., El Cardón en Baja California Sur y Chetumal en Quintana Roo. Para el caso de El Cardón y Chetumal se concluye que utilizar la función de distribución de Weibull es una buena aproximación para describir los regímenes de viento de dichas localidades, tal como se observa en las figuras 2.13, 2.14, 2.15 y 2.16. Mientras tanto, se comprobó que no es válido generalizar la distribución de Weibull como una metodología para evaluar todos los sitios en que se pretende realizar un emplazamiento eólico, ya que como puede apreciarse claramente en las figuras 2.17 y 2.18 en La Venta Oax., se presenta una distribución de velocidades de viento Bimodal. Este tipo de comportamiento del viento se debe tomar en cuenta al realizar cálculos relacionados con la producción de energía en esa zona. Al realizar las funciones de distribución se determinaron las principales características del recurso eólico ya mencionado, éste puede verse en la tablas 2.3 y 2.4. En estas tablas, y en la visualización de las gráficas de las funciones de distribución, podemos concluir que el mejor recurso eólico se presenta en La Venta Oax., seguido de El Cardón BCS. y al final, con un recurso pobre, Chetumal Q. Roo.

De acuerdo con los resultados de simulación se observa que, para satisfacer la misma carga, el sistema con menor capacidad nominal corresponde a la localidad de La Venta, seguida por El Cardón y finalmente Chetumal (ver tablas 4.2, 4.3 y 4.4), ya que la capacidad instalada es función del recurso eólico disponible en la localidad.

Como se aprecia en la tabla 5.4 se consideraron valores sobredimensionados del aerogenerador para compensar el crecimiento de la carga durante el periodo de operación de 5 años. Dicho crecimiento se consideró de 7 a 8% durante el periodo de operación.

La metodología para hallar la potencia nominal del aerogenerador se considera adecuada, ya que resultó con muy buena aproximación para determinar la potencia de dicho elemento y por tanto, mediante la variación de los componentes del sistema de hidrógeno, determinar la configuración óptima del sistema.

Se determinó que un factor de planta mayor en la operación del aerogenerador repercute directamente en un Costo Nivelado de Producción menor. Se observa en la tabla 5.5 que los valores del factor de planta y el CNP son no lineales y obedecen una regresión de tipo geométrica como se muestra en la relación 5.15 y en la figura 5.1.

En cuanto al inicio de operación del sistema híbrido para poder lograr una operación totalmente autónoma se determinó que para el caso de La Venta y El Cardón es posible iniciar la operación del sistema híbrido al inicio del año, mientras que para Chetumal se hizo necesario coincidir el inicio de operación del sistema con la primavera, pues es la estación del año que mayor recurso eólico

Localidad	Calculado[W]	Simulación[W]	Diferencia[W]	Sobredimensión[%]
La Venta	3232	3700	270	8.35
El Cardón	5541	6000	459	7.65
Chetumal	19396	21000	1604	7.63

Tabla 5.4: Potencia nominal del aerogenerador calculada y encontrada en la simulación

Localidad	Fp[-]	CNP[USD/kWh]
Chetumal	0.10	5.13
El Cardón	0.35	0.99
La Venta	0.60	0.34

Tabla 5.5: Costos Nivelado y Factor de Planta de los estudios de caso.

presenta en dicha localidad. Si se iniciara la operación del sistema en Chetumal a principios del año, la operación del sistema no sería posible de manera ininterrumpida durante todo el año, ya que el recurso eólico es pobre y no es posible satisfacer la demanda ininterrumpida de la carga.

Finalmente, comparado con otras tecnologías como la fotovoltaica, notamos que es posible la implementación técnica y económica de un sistema híbrido como el propuesto para sitio cuyo factor de planta sea mayor que 32 %.

Como trabajo a futuro se propone un modelado más detallado del sistema de hidrógeno (electrolizador y celda ecombustible, donde se considere un análisis del efecto en la variación de la temperatura de operación, presión de los gases, etc. Igualmente sería deseable modelar el sistema con diversas cargas variables y perfeccionar la metodología para encontrar la configuración óptima del sistema híbrido. Impulsar la investigación y desarrollo en la implementación de sistemas híbridos, así como la reducción de costos y mayores potencias de operación.

REFERENCIAS

- Afgan N.H. and Maria G. Carvalho (2004). Sustainability assessment of hydrogen energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 29, Issue 13, October 2004, Pag 1342.
- Apra J.L., Bolcich J.C.(2005) Tecnologías del hidrógeno. OPET-OLA. Asociación Argentina del Hidrógeno. Argentina 2005
- Betz A. (1919) Schraubenpropeller mit Geringsten Energieverlust, *Nach. Der Kg1. Gesellschaft der Wiss. Zu Gottingen, Math.-Phys*
- Burton T, Sharpe D, Jenkins N., Bosanyi E., (2001) *WIND ENERGY HANDBOOK* John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England
- Cano C.U.(1999) Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica. *Bolín iie*. Septiembre/Octubre 1999
- Cheremisnoff N. P. (1978) *Fundamentals of Wind Energy*. Ann Arbor Science. Michigan. USA.
- Counihan J. (1975) Adiabatic Atmospheric Boundary Layer: A Review and Analysis of Data Collected From the Period 1880-1972. *Atmospheric Environment*, 9.
- Courtesy C. Campbell & J. Laherrere (1998) *Science*, vol. 281, Aug. 21, 1998, p.1128
- Dutton, J. A. M. Bleijs, H. Dienhart, M. Falchetta, W. Hug, D. Prischich and A. J. Ruddell (2000). Experience in the design, sizing, economics, and implementation of autonomous wind-powered hydrogen production systems *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 25, Issue 8, 1 August 2000, Pages 705-722.
- DOD (2006) Department of Defense USA. www.dodfuelcell.com.
- EG and G Technical Services, Inc.(2004). |*Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)* Science Applications International Corporation. November 2004
- Fundacion terra (2003). *Perspectiva ambiental Hidrógeno solar*, abril 2003. España
- González, E. McKeogh and B. Ó. Gallachóir (2004). The role of hydrogen in high wind energy penetration electricity systems: The Irish case. *Renewable Energy*, Volume 29, Issue 4, April 2004, Pages 471-489.
- Guillen S.O., Fortino M.N.(2004). Herramientas de análisis para la simulación de sistemas híbridos. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de energías no convencionales. México.
- Hellman G. (1915), *Über die Bewegung der Luft in den untersten schichten der Atmosphere*, *Meteorol Z*.
- IEA,(2004) International Energy Agency. *Energy Statistics*
- IEA,(1994) International Energy Agency. *Estimation of cost of energy from wind energy conversion system*. Submitted to executive committee of the IEA for R&D on Wind Energy Conversion System, 2nd ed.1994.
- HFC(2007) *Electrolyzer*. Hydrogen and Fuel Cell inc. USA
- IEC(2005) International Electrotechnical Commission. *Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. Switzerland. 205
- IIE(2006) Instituto de Investigaciones Eléctricas, Base de datos anemométrica de la Gerencia de Energías no convencionales
- Iqbal.(2003) Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system *Renewable Energy*, Volume 28, Issue 2, February 2003, Pages 223-237.
- Jaramillo O.A. Borja M.A (2004) Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case *Renewable Energy* 29 (2004) 1613–1630

- Khan, Kelly Hawboldt and M. T. Iqbal. (2005) Life Cycle Analysis of wind–fuel cell integrated system Renewable Energy, Volume 30, Issue 2, February 2005, Pages 157-177.
- Kottenstette and J. Cotrell.(2004) Hydrogen storage in wind turbine towers. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 29, Issue 12, September 2004, Pages 1277-1288
- Kotz and Nadarajab(2000) Extreme Value Distributions: Theory and Applications. Imperial College press, London,
- Justus C.G., (1978), Winds and Wind system performance, Franklin institute Press, Philadelphia, PA.
- Larminie J. Dicks A, (2001) Fuel cell system explained. John Wiley and Sons Ltd. USA
- Manwell J.F. McGowan J.G, Rogers A.L. (2002), Wind Energy Explained Theory, Design and Application, John Wiley and Sons Ltd., England
- McLaughlin M. (1999). Regress+. Appendix A Compendium of Common Probability Distributions. September 1999
- NREL (2002) Energy AnalysisOffice (www.nrel.gov/analysis/docs/curves_2002.ppt). October 2002.
- NREL(2004)
- Patel M.R (1999) Wind and Solar Power System. CRC Press LLC.USA
- Ramos N. G, Fiscal E. (1999), Variables que influyen en el consumo de energía eléctrica. Boletín IIE, enero/febrero 1999
- Rohatgi J.S. Nelson Vaughn (1994) Wind Characteristics an Analysis for the Generation of Win Power. Alternative Energy Institute. West Texas A&M University. USA.
- (Sandoval, 2006) Sandoval A. Desarrollo de un Modelo Fenomenológico Para Electrogenerar Hidrógeno, Por Medio De La Electrólisis Del Agua. 2006
- Sapru K, Stetson NT, Ovshinsky SR (1997). Development of a small scale hydrogen production storage system for hydrogen applications. Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 3–4. 1997
- Sherif, S.A. Barbir F and. Veziroglu T.N. (2005) Wind energy and the hydrogen economy—review of the technology. Solar Energy, Volume 78, Issue 5, May 2005, Pages 647-660
- Winter, J. C.- Nitsch J. Eds (1988). Hydrogen as an Energy Carrier, in:, Springer, Berlin, 1988.
- Wright S.E.(1994) Comparison of the theoretical performance potential of fuel cells and heat engines. Renewable Energy 29 (2004) 179-195
- www.wikipedia.org , 2007.
- www.windpower.org