



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRICA – SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO: EÓLICO – CELDA DE
COMBUSTIBLE CON GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MARIA FERNANDA ALVAREZ MENDOZA

TUTOR
DR. CÉSAR ÁNGELES CAMACHO
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. OCTUBRE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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. FUERTE ESQUIVEL CLAUDIO RUBÉN
Secretario: DR. MAYA ORTIZ PAUL ROLANDO
Vocal: DR. ÁNGELES CAMACHO CÉSAR
1er. Suplente: DR. JARAMILLO SALGADO OSCAR ALFREDO
2do. Suplente: M.I. LORENZO BAUTISTA RODOLFO

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. César Ángeles Camacho

FIRMA

Dedicatoria:

***A mis padres y mi hermana,** por su apoyo incondicional,
por siempre apoyarme en mis decisiones y
por los grandes momentos que me han dado.*

***A mis amigos,** por su apoyo y sincera amistad*

Agradecimientos

Agradezco al Dr. César Ángeles Camacho, por aceptarme como alumna, por sus enseñanzas y por su apoyo.

También a mis compañeros por compartir sus conocimientos y experiencias conmigo.

Y por último a los profesores de la maestría por sus enseñanzas, apoyo y motivación para llegar a este punto y realizar este trabajo.

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presenta una alternativa de generación eléctrica con la integración de un sistema híbrido con base en la generación eólica – celda de combustible, conteniendo además un electrolizador que genera hidrógeno para abastecer la celda. También se realiza un análisis de lo que ocurre en la red eléctrica al conectar este sistema en un nodo, mostrando las ventajas y posibles desventajas de su implementación.

El uso de técnicas de análisis de la red eléctrica, así como el modelado del sistema de generación renovable y la unión con dicha red eléctrica, son herramientas que permiten el análisis de respuesta de sistemas eléctricos para encontrar soluciones más eficaces en la unión de la energía eléctrica renovable con la red de distribución. Este trabajo de investigación propone un modelo de sistema híbrido Eólico-Hidrógeno con integración de celda de combustible el cual es integrado a la red eléctrica para investigar su contribución en la red de potencia. El modelo de generación de viento toma en cuenta la velocidad del viento, el de electrolizador y celda de combustible toma la generación y consumo de hidrógeno (H_2) como pieza fundamental en el modelado, así como la generación de potencia proporcionada por ambos generadores.

Los resultados son presentados a partir de gráficas de potencia activa, el proceso del hidrógeno incluyendo generación, almacenamiento y uso para los diferentes componentes y voltajes nodales en la red eléctrica de prueba, así como en el análisis de casos puntuales mostrando Tablas de datos con los resultados obtenidos.

Para realizar el modelo del sistema híbrido y analizar su incorporación a la red eléctrica, se utiliza una red de prueba de cinco nodos, y todo el algoritmo es codificado utilizando Matlab ® 2012.

ABSTRACT

This thesis work presents an alternative electricity generation by integrating a hybrid system based on wind generation-fuel cell, also containing an electrolyzer that generates hydrogen to supply the cell. Also an analysis is made about what happens in the electric grid when the system is connected to a single node, showing the advantages and possible disadvantages of its implementation.

By using techniques of electrical network analysis and system modeling renewable generation and the union with this network are tools that allow analysis of power system response to find more efficient solutions in binding energy renewable electric with the distribution network. This research work proposes a hybrid system model Wind-Hydrogen with integration of fuel cell which is incorporated into the distribution network to investigate its contribution to the power grid.

The wind generation model takes into account the wind speed, the electrolyzer and fuel cell takes the generation and consumption of hydrogen (H_2) as a fundamental part in the model, as well as the generation of power provided by both generators.

Results are presented from graphs of active power, including the process of hydrogen generation, storage and use for different components and nodal voltage test grid, as well as an analysis of specific cases showing data tables with the results.

To make the hybrid system model and analyze its implementation to the electric grid, a test network of five nodes is used, and the whole algorithm is coded using Matlab ® 2012.

CONTENIDO

RESUMEN	V
ABSTRACT.....	VI
CONTENIDO	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	XV

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 MOTIVACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.4 HIPÓTESIS	3
1.5 OBJETIVOS	4
1.7 CONTRIBUCIONES DE LA TESIS.....	5
1.8 PUBLICACIONES.....	6
1.9 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	6
1.10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7

CAPÍTULO 2

ELEMENTOS ESENCIALES DEL SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-HIDRÓGENO CON INTEGRACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE.....	8
2.1 INTRODUCCIÓN.....	8
2.2 DEFINICIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS.....	10
2.3 PROPÓSITO DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS BASADOS EN ENERGÍAS RENOVABLES	11
2.4 ENERGÍA EÓLICA	12
2.4.1 Variaciones de velocidad de viento a largo plazo.....	18
2.4.2 Selección del lugar para el aerogenerador	18
2.4.3 Medición y Evaluación del Viento	19
2.4.4 Potencia Extraída del Viento	22
2.5 PARTES DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA.....	24
2.5.1 Góndola.....	25
2.5.2 Torre.....	28
2.5.3 Turbina Eólica.....	29
2.5.4 Mecanismo de Orientación	31
2.5.5 Caja de Cambios	31
2.5.6 Generador eléctrico	31
2.5.7 Sensores de velocidad y control.....	32
2.6 SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO.....	33
2.6.1 Electrolizador.....	34
2.6.2 Almacenamiento y distribución	36
2.7 CELDA DE COMBUSTIBLE	38
2.8 SISTEMA HÍBRIDO	40

2.9	CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICA-HIDRÓGENO CON ALMACENAMIENTO EN CELDA DE COMBUSTIBLE	41
2.10	MODELADO DEL SISTEMA HÍBRIDO.....	42
2.10.1	Energía Eólica	42
2.10.2	Electrolizador.....	47
2.10.3	Celda de Combustible	49
2.11	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

CAPÍTULO 3

APLICACIÓN EN CASO DE ESTUDIO.....55

3.1	CASO DE ESTUDIO.....	55
3.1.1	Análisis de Resultados	57
3.1.2	Análisis de Resultados de Flujos Continuos.....	61
3.1.3	Análisis de resultados de flujos de potencia en casos puntuales	76
3.1.4	Discusión de resultados.....	79
3.2	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS81

4.1	CONCLUSIONES.....	81
4.2	TRABAJOS FUTUROS	81

APÉNDICE A

SISTEMAS HÍBRIDOS BASADOS EN ENERGÍAS RENOVABLES83

A.1	ENERGÍAS RENOVABLES.....	83
A.1.1.	Energía Fotovoltaica.....	83
A.1.2.	Biomasa.....	85
A.1.3.	Hidroeléctrica.....	86
A.1.4.	Energía de las Olas y las Mareas.....	88
A.2	ALGUNOS SISTEMAS HÍBRIDOS.....	90
A.2.1	Sistema híbrido de combinación de calor y potencia (CHP).....	90
A.2.2	Eólica – Fotovoltaica	91
A.2.3	Generación Hidro – Eólica.....	92
A.2.4	Hidroeléctrica – Fotovoltaica	93
A.3	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

APÉNDICE B

TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE97

B.1	TIPO PEMFC.....	97
B.2	TIPO AFC.....	97
B.3	TIPO PAFC.....	97
B.4	TIPO MCFC.....	98
B.5	TIPO SOFC	98
B.6	TIPO DMFC.....	98
B.7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

APÉNDICE C

HOJAS DE DATOS99

C.1	AEROGENERADOR GAMESA G80-2.0MW [1].....	99
C.2	CILINDRO DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO [2].....	101
C.3	ELECTROLIZADOR ZDQ-300 [3].....	102
C.4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 Molino de viento de hojas de acero bombeando de agua en el medio oeste norteamericano (finales de 1800) [7]	12
Figura 2. 2 Turbina eólica moderna para generación de energía a gran escala [6]	13
Figura 2. 3 Capacidad Eólica instalada a nivel mundial por región [11]	14
Figura 2. 4 Turbinas de eje horizontal. (a) Vela. (b) Multi-pala. (c) Hélice	15
Figura 2. 5 Turbinas de eje vertical. (a) Savonius. (b) Darrieus	15
Figura 2. 6 Conexión típica de parque eólico [14]	16
Figura 2. 7 Capacidad de producción eólica en México [15].	17
Figura 2. 8 Distribución Weibull	20
Figura 2. 9 Ejemplos Rosas del viento, (a) costa Atlántica de Francia [17], (b) Sitio en Zacatecas, México [18].	21
Figura 2. 10 Curva de coeficiente de potencia	23
Figura 2. 11 Curva de potencia típica para una turbina eólica de 1.5MW	24
Figura 2. 12 Partes del generador eólico.	25
Figura 2. 13 Frenos del disco (a) Flecha de alta velocidad (b) Flecha de baja velocidad.....	27
Figura 2. 14 Frenos del disco en las flechas de alta y baja velocidad (a) Flecha de alta velocidad (b) Flecha de baja velocidad.	27
Figura 2. 15 (a) Torre tubular de acero (b) Torre de celosía (c) Torres de mástil tensado con vientos (d) Transporte de torre eólica al sitio de construcción [19].	28
Figura 2. 16 Aerogeneradores de diferentes tamaños	29
Figura 2. 17 Máquina de inducción de 2 MW. [6]	32
Figura 2. 18 Ciclo básico de producción de hidrógeno por electrólisis de agua	34
Figura 2. 19 Electrolizador PEM [24, 25]	35
Figura 2. 20 Hidrógeno líquido y gaseoso	37
Figura 2. 21 Electroquímica de la celda de combustible [26].....	39
Figura 2. 22 Fragmento de viento que cruza el aerogenerador	42
Figura 2. 23 Curva de potencia de Aerogenerador observada en el Apéndice C.....	45
Figura 2. 24 Curva típica C_p/λ para una turbina eólica	46
Figura 2. 25 Triángulo de potencias activa (P), reactiva (Q) y aparente (S).....	47
Figura 2. 26 Experimento de electrólisis del agua. (Nota. Las flechas representan el flujo de electrones negativos de - a +)	48
Figura 2. 27 Esquema representativo de PEMFC [23]	50
Figura 3. 1 Diagrama de flujos potencia en el escenario de energía renovable solamente.	56
Figura 3. 2 Diagrama de conexión del sistema híbrido	56
Figura 3. 3 Curva de coeficiente de potencia calculado para el generador Gamesa G80-2.0MW.....	58
Figura 3. 4 Velocidad del viento en un mes (Enero, 2012)	58
Figura 3. 5 Función de densidad de la probabilidad de Weibull con parámetro de forma $k=1, 2, y 3$ (con parámetro de escala $c= 8$)	59
Figura 3. 6 Distribución de Weibull	60
Figura 3. 7 Rosa del viento	60
Figura 3. 8 Potencia activa extraída del aerogenerador	60
Figura 3. 9 Potencia reactiva del aerogenerador.....	61
Figura 3. 10 Diagrama de red de cinco nodos con conexión del sistema híbrido.....	61
Figura 3. 11 Curvas de demanda activa en nodos en red.....	62
Figura 3. 12 Curvas de potencia activa de los generadores de la red	62

Figura 3. 13 Curva de potencia activa de los generadores de la red con demandas al tercio del original	63
Figura 3. 14 Curvas de comportamiento de potencia activa de los generadores en la red con demandas al tercio del original	64
Figura 3. 15 Curvas de potencia activa del generador eólico, FC y total del sistema híbrido	65
Figura 3. 16 Curvas de demanda de potencia activa total del nodo Main y potencia activa generada por el sistema híbrido.....	65
Figura 3. 17 Curvas de generación, almacenamiento y gasto de hidrógeno	66
Figura 3. 18 Curvas de demanda total del nodo Main y demanda resultante del nodo Main	66
Figura 3. 19 Curvas de demandas de nodos de red eléctrica	66
Figura 3. 20 Curvas de magnitudes de voltajes nodales	67
Figura 3. 21 Curvas de magnitudes de voltaje en el nodo Main.....	67
Figura 3. 22 Curvas de potencia activa enviada en las líneas de transmisión.....	68
Figura 3. 23 Curvas de potencia activa enviada en las líneas de transmisión con demandas al tercio del original	68
Figura 3. 24 Escenario en que la demanda sobrepasa la generación del sistema híbrido, nodo Main.....	69
Figura 3. 25 Curvas de potencia activa enviada en las líneas de transmisión para el escenario 1	69
Figura 3. 26 Curvas de magnitudes de voltajes nodales y del nodo Main para el escenario 1	70
Figura 3. 27 Curvas de potencia activa de los generadores de la red para el escenario 1	71
Figura 3. 28 a) Curvas de demanda total del nodo Main demanda resultante del nodo Main b) Curvas de demanda de potencia activa total del nodo Main y potencia activa generada por el sistema híbrido para el escenario 1	71
Figura 3. 29 a) Curvas de potencia activa del generador eólico y FC b) Curvas de generación, almacenamiento y gasto de hidrógeno para el escenario 1	72
Figura 3. 30 Escenario en que la generación del sistema híbrido sobrepasa la demanda, nodo Main.....	72
Figura 3. 31 Curvas de potencia activa enviada en las líneas de transmisión para el escenario 2	73
Figura 3. 32 Curvas de magnitudes de voltajes nodales y del nodo Main para el escenario 2	74
Figura 3. 33 Curvas de potencia activa de los generadores de la red para el escenario 2.....	74
Figura 3. 34 a) Curvas de demanda total del nodo Main demanda resultante del nodo Main b) Curvas de demanda de potencia activa total del nodo Main y potencia activa generada por el sistema híbrido para el escenario 2	75
Figura 3. 35 a) Curvas de potencia activa del generador eólico y FC b) Curvas de generación, almacenamiento y gasto de hidrógeno para el escenario 2	75
Figura 3. 36 Caso 1a: máxima demanda y generación del sistema híbrido	76
Figura 3. 37 Caso 2a: mínima demanda y máxima generación del sistema híbrido	77
Figura 3. 38 Caso 3a: mínima demanda y generación del sistema híbrido.....	77
Figura 3. 39 Caso 4a: máxima demanda y mínima generación del sistema híbrido	78
Figura A. 1 Estructura básica de una juntura p-n de una celda solar [2].	84
Figura A. 2(a) Capacidad hidroeléctrica instalada por región actualmente, (b) Principales países productores de energía eléctrica [5].	88
Figura A. 3 Formas de generación eléctrica por medio de la energía mareomotriz	89
Figura A. 4 CHP usando calor residual para generar electricidad [11]	90
Figura A. 5 CHP de recuperación de calor [11]	91
Figura A. 6 (a) Esquema base de un sistema Solar fotovoltaico – eólico (b) Sistema híbrido Eólico-Fotovoltaico – Diésel [11].	91
Figura A. 7 Esquema de central hidroeléctrica [15]	92
Figura A. 8 Esquema de instalación de sistema híbrido	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1 Recursos energéticos no-renovables de la tierra [2].	9
Tabla 2. 2 Fuentes de energía renovable [4].	9
Tabla 2. 3 Beneficios del uso de Electricidad Renovable [6].	11
Tabla 2. 4 Tipos de Celdas de combustible y características [25].	38
Tabla 2. 5 Clases de rugosidad y Longitud de rugosidad [37].	45
Tabla 3. 1 Pérdidas de potencia por línea en pu para los casos puntuales 1b y 2b sin el sistema híbrido conectado	78
Tabla 3. 2 Voltajes nodales de la red de cinco nodos para los casos puntuales 1b y 2b sin el sistema híbrido conectado.....	79
Tabla 3. 3 Pérdidas de potencia por línea en pu para los casos (a) con el sistema híbrido conectado	79
Tabla 3. 4 Voltajes nodales de la red de cinco nodos para diferentes valores de generación del sistema híbrido para los casos (a)	79
Tabla A. 1 Capacidad hidroeléctrica por país/región [2].	87

LISTA DE SÍMBOLOS

\sim	Aproximadamente
H_2	Hidrógeno
CO_2	Bióxido de carbono
H_2O	Agua
O_2	Oxígeno
SO_2	Bióxido de azufre
NO_x	Óxido de nitrógeno
e^-	Electrón
SO_3H	Ácido sulfónico
H^+	Protón de hidrógeno o ion positivo de hidrógeno
P_o	Potencia mecánica extraída por el rotor.
V_i	Velocidad del viento aguas arriba, a la entrada de las palas del rotor.
V_o	Velocidad del viento aguas abajo, a la salida de las palas del rotor.
C_p	Factor de eficiencia denominado coeficiente de potencia
P_e	Potencia en watts
ρ	Densidad del aire
A	Área de barrido de las aspas del rotor
H_1	Altura de la velocidad del viento a ser calculada
H_2	Altura a la que fueron medidos los datos de velocidad del viento
V_{cor}	Velocidad del viento corregida
V_w	Velocidad del viento medida
\dot{m}	Tasa de caudal por segundo
z	Longitud de tosquedad o rugosidad del suelo
ρ_{ref}	Densidad del aire de referencia
h	Altura del sitio sobre el nivel del mar
T	Temperatura ambiente promedio den centígrados
P_{dis}	Potencia disponible por metro cuadrado de área del rotor
$P_{VelTurb}$	Potencia según cierta velocidad del viento
C_p/λ_{Curva}	Coeficiente de potencia con respecto a la velocidad periférica
P_{nom}	Potencia eólica entregada según valores nominales

λ	Velocidad periférica
V	Voltaje
X_c	Reactancia del banco de capacitores
X_m	Reactancia de magnetización
X	Suma de las reactancias del estator y rotor
R	Suma de las resistencias del estator y el rotor
P	Potencia activa
V_g	Volumen del gas
R	Constante ideal de gases
I	Corriente
T	Temperatura
t	Tiempo
z	Número de exceso de electrones
p	Presión ambiente
F	Constante de Faraday
E	Voltaje de circuito abierto reversible
n	Cantidad de celdas de combustible en el stack
V_C	Voltaje de celda
P_e	Potencia eléctrica
V_{H_2}	Volumen de hidrógeno requerido
V_{mean}	Velocidad del viento media
c	Parámetros de escala de distribución Weibull
k	Parámetros de forma de distribución Weibull
$F_w(V_w)$	Función de Weibull de la Distribución de Probabilidad

LISTA DE ACRÓNIMOS

ESPAÑOL

pu	Por unidad
g	Gramos
m	Metros
m ²	Metros cuadrados
mm	Milímetros
m/s	Metros por segundo
V	Volts
Hz	Hertz
kWh	Kilowatts hora
MWh	Megawatts hora
GWh	Gigawatts hora
TWh	Terawatts hora
TWh/año	Terawatts hora por año
GWh/año	Gigawatts por hora por año
kWh/kg	Kilowatts hora por kilogramo
MW	Megawatt
kW	Kilowatt
GW	Gigawatt
TW	Terawatt
MJ	MegaJoules
W/m ²	Watt por metro cuadrado
kW/m	Kilowatt por metro
kg/s	Kilogramos por segundo
kg/m ³	Kilogramos por metro cubico
Nm ³ /h	Metro cubico normal por hora
MPa	MegaPascales
Psi	Pounds per square inch / libra-fuerza por pulgada cuadrada
°C	Grados Centígrados
°K	Grados Kelvin

Mtoe	Millones de toneladas equivalentes de petróleo
r.p.m	Revoluciones por minuto
kN	KiloNewton
CRE	Comisión Reguladora de Energía
CFE	Comisión Federal De Electricidad
AMDEE	Asociación Mexicana de Energía Eólica
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio
<i>D/B/%</i>	Porcentaje de densidad bruta
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
CHP	Producción combinada de calor y potencia
Gen	Generación
MX\$	Peso mexicano
US\$	Dolar Estadounidense

INGLES

U.S	United States
U.K.	United Kingdom
U.S.A	United States of America
WEC	Wind Energy Council
WECS	Wind Energy Conversion Systems
GEF	Global Environment Fund
CSP	Concentrated Solar Power
FCV	Fuel Cell Vehicles
DOE	Department of Energy
PEM	Polymer electrolyte membrane
R&D	Research and Development
FC	Fuel cell
RAPS	Remote Areas Power Systems
DC	Direct current
AC	Alternating current
GRP	Glass Reinforced Plastic
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
AFC	Alkaline Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Debido a los actuales cambios climáticos provocados por el daño al medio ambiente y teniendo en cuenta que los combustibles fósiles no son renovables, se vio la necesidad de encontrar nuevas formas de energías renovables entre las cuales se encuentran la eólica y el uso del hidrógeno como sistema de almacenamiento. Por otro lado, la necesidad de ajustar la oferta energética a la demanda exige en general una etapa de almacenamiento de energía. Esta exigencia es más patente en el caso de las energías renovables de origen eólico por su carácter fluctuante debido a las condiciones meteorológicas locales. El hidrógeno se perfila en estos momentos como una solución más probable al almacenamiento energético debido a que no presenta residuos contaminantes.

Un sistema autónomo o sistema de potencia eólico residencial puede no ser suficiente o le puede ser difícil cubrir la cantidad de carga eléctrica actual, por lo que es necesario complementar la potencia eólica con otro tipo de energía, solar, hidro, etc., o incluso con sistemas de almacenamiento. Los sistemas de potencia híbridos, combinan dos o más dispositivos de conversión de energía, o dos o más combustibles para el mismo dispositivo, que cuando se integran, superan las limitaciones inherentes en cada uno de ellos; además, dichos sistemas de potencia pueden ofrecer soluciones y valor a consumidores que tecnologías individuales no pueden igualar.

Por otro lado, la tecnología del hidrógeno estudia el uso de este elemento químico como combustible limpio para generar energía eléctrica o térmica. Su gran ventaja medio ambiental radica en la reducción de emisiones contaminantes de CO₂, óxidos de nitrógeno y azufre, no consume recursos naturales y es abundante. La fuente más común de hidrógeno es el agua (H₂O) y la forma más común para obtenerlo es por la descomposición electroquímica del agua en oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂) a partir de la acción de una corriente eléctrica (electrólisis), la cual puede ser generada usando fuentes de energía renovable (solar fotovoltaica, eólica, etc.). El hidrógeno puede ser comprimido y almacenado en tanques por varios meses hasta que se le necesite. La celda de combustible utiliza de una manera limpia y eficiente el hidrógeno, recombina el hidrógeno y el oxígeno para producir energía eléctrica, obteniendo como único subproducto agua pura [1]. Como posible desventaja, está la existencia de cantidad de hidrógeno requerido como combustible de forma continua por la celda de combustible para gran cantidad de horas de trabajo constante.

En el presente trabajo de investigación, relacionado con el sistema de potencia eólico y almacenamiento de hidrógeno, el sistema híbrido total es modelado para recrear la eficiencia y potencia producida, tomando en cuenta la carga actual requerida en una localidad y mostrando el hecho que implementando este tipo de sistemas es posible reducir a un mínimo el uso de combustibles fósiles o incluso eliminarlos.

1.2 ANTECEDENTES

En la última década ha crecido el interés por la modelación y optimización del comportamiento energético y económico de los sistemas de energía. Los sistemas autónomos de energías renovables y la integración con los sistemas de almacenamiento de hidrógeno, como opción para almacenar energía, se han ubicado a la vanguardia de la investigación en el campo de las energías renovables, lo cual denota la importancia y el interés que se le ha venido dando a esta tecnología para el futuro desarrollo de la economía. Sin embargo, es notable que la mayoría de estos proyectos se han desarrollado en países del primer mundo, donde al contarse con recursos para tales desarrollos se ha priorizado el análisis de grandes sistemas conectados a la red, o sistemas autónomos grandes que actualmente utilizan generadores diésel, siendo menos estudiados los sistemas autónomos medios y pequeños, que resultan de menor interés desde el punto de vista energético en estos países. Por esta razón, los resultados de estos análisis no son totalmente aplicables a sistemas autónomos pequeños, que si tienen aplicaciones y son muy importantes para los países en vías de desarrollo.

La energía eólica ha sido aprovechada desde hace siglos por el hombre en actividades de producción como el bombeo de agua y para moler granos, esto en los siglos XVI y XVII, luego el primer generador eólico en Estados Unidos fue instalado en 1890 y hasta el día de hoy es una tecnología de producción eléctrica que ha tenido una evolución continua. Se han llevado a cabo diferentes estudios e investigaciones de todo tipo, entre dichos estudios, hay con respecto a la influencia económica debido a las fluctuaciones que presenta la energía eólica [2], se han llevado a cabo estudios de evaluación de los riesgos que la energía eólica producen en el funcionamiento de un sistema [3] donde se cuantifica la variabilidad de la generación eólica en distribución de probabilidad, investigaciones sobre la incorporación del modelo de generador eólico en el análisis de flujos dinámicos de potencia [4] donde se desarrolla un modelo de central eólica y se implementa en la red eléctrica, se han diseñado modelos para la turbina eólica, como es el caso del modelo y control de la turbina eólica con generador de inducción con doble alimentación [5], entre otras investigaciones y estudios. Existen lugares, como es el caso de China, en que la energía eólica ha sobrepasado la generación eléctrica nuclear [6].

El hidrógeno fue utilizado como combustible en una máquina auto sostenible de combustión interna, desarrollado por el reverendo William Cecil en los años 1800's, el título de su artículo no deja duda de su interés en el hidrógeno como combustible: "Aplicación del gas de hidrógeno para producir fuerza motriz en maquinaria, con descripción de un motor movido por la presión de la atmosfera en un vacío causado por la explosión de gas de hidrógeno y el aire atmosférico" ("*On the Application of Hydrogen Gas to Produce a Moving Power in Machinery; with a Description of an Engine Which is Moved by the Pressure of the Atmosphere upon a Vacuum Caused by Explosion of Hydrogen Gas and Atmospheric Air*" el título original en inglés) y hasta la actualidad se han desarrollado varios estudios sobre el hidrógeno como combustible, pero después de la segunda guerra mundial el interés por el hidrógeno se vio disminuido por el bajo costo de la gasolina. En los 60's el programa espacial de USA llevó a cabo considerables esfuerzos en el desarrollo de la tecnología del hidrógenos como combustible de los cohetes, particularmente en el programa Apolo [7]. Actualmente se han realizado diferentes estudios e investigaciones en muchos países teniendo en cuenta sistemas híbridos con el hidrógeno y la celda de combustible y sin éstos, entre ellos se encuentran, el de celda de combustible, hidrógeno y suministro de energía en Australia [8], investigación sobre el sistema integrado de energía eólica y producción de hidrógeno en agua electrolítica no conectado al sistema de red eléctrica [9], entre otras.

1.3 MOTIVACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

La contaminación del medio ambiente en el que vivimos debido al uso de combustibles fósiles, es la problemática por la cual se vio la necesidad de utilizar métodos alternativos para la generación de energía eléctrica, siendo ésta una de las necesidades primarias en la sociedad actual tanto industrial como en el día a día de todo ser humano. Se vio como solución el uso de energías renovables, teniendo en cuenta que estas en su mayoría no contaminan el medio ambiente.

Entre las diferentes fuentes de energía renovable, se observa que el nivel de estabilidad (es decir, que se mantengan constantes en el tiempo) que presentan dependen de condiciones variables, por lo tanto no son fuentes de energía eléctrica estables y presentan variaciones en su salida de potencia, como ejemplo se encuentra el uso de celdas fotovoltaicas, las cuales dependen de la cantidad de luz solar que las alcance y las horas del día en la que pueden generar energía de forma “eficiente”, pero para ello deben de cumplir condiciones tales como cielo despejado, ninguna interferencia de sombra, etc.

Observando lo anterior, se da como solución el tener otro sistema de generación eléctrica como respaldo, por lo que se introduce el sistema híbrido y su conexión al sistema eléctrico actual. La conexión del sistema híbrido a la red de distribución, afecta a la misma por lo cual se ve la necesidad de realizar estudios, entre estos el actual proyecto de investigación aplicado para el sistema híbrido eólico – celda de combustible con generación y almacenamiento de hidrógeno.

Teniendo en cuenta las aplicaciones de análisis de redes eléctricas, es necesario hacer un estudio previo a la implementación física de un sistema híbrido a la actual red eléctrica, el analizar la influencia que este sistema híbrido, más específicamente el sistema híbrido eólico-hidrógeno con integración de celda de combustible, pueda tener, sus ventajas y desventajas de conexión en diferentes puntos de la red, por lo que se requiere el modelado del sistema para su implementación en el análisis de redes eléctricas, logrando así la reducción de costos al momento de la implementación y teniendo en cuenta las ventajas que se van a obtener.

La característica principal de la implementación del hidrógeno como almacenamiento de energía, en comparación de otras formas de almacenamiento actuales, para su posterior aprovechamiento en la generación de energía eléctrica, es debido a que no presenta contaminación alguna para el medio ambiente a diferencia del uso de baterías que al final de su vida útil por los químicos que presentan son contaminantes y nocivos para la salud y el medio ambiente.

1.4 HIPÓTESIS

La integración del sistema híbrido eólico-celda de combustible, beneficia la operación de la red eléctrica al reducir las pérdidas en las líneas de transmisión.

1.5 OBJETIVOS

Modelar y llevar a cabo la simulación de una red eléctrica que incluye sistema de generación híbrido, eólico/hidrógeno desde el punto de vista de la potencia de generación.

Los objetivos particulares son:

- Entender a fondo el funcionamiento de la generación híbrida de energía eólica e hidrógeno para su modelado.
- Modelar matemáticamente la generación eléctrica a partir de la energía eólica con base en datos ya establecidos para su aplicación en una red de distribución.
- Modelar la generación de hidrógeno a partir de la energía eólica.
- Modelar matemáticamente la generación eléctrica a partir de la energía del hidrógeno usando datos ya establecidos para su aplicación en una red de distribución.
- Unificar los modelos en un solo sistema híbrido para observar y analizar su funcionamiento y respuesta en una red eléctrica con la conexión de los dos sistemas a la vez.

1.6 METODOLOGÍA CIENTÍFICA

La metodología que se propone para llevar a cabo este proyecto converge en los conceptos de análisis de redes eléctricas y manejo de energías renovables por lo que se procederá de la siguiente forma:

1.6.1 Análisis y recolección de datos para el modelado de los diferentes generadores de energía renovable.

Análisis de funcionamiento teniendo en cuenta los factores más destacables de los dos tipos de generación eléctrica renovable a implementar: Incluye las actividades encaminadas a la obtención de información suficiente de los dos tipos de generación renovable (eólica e hidrógeno), una observación de los estudios anteriores hasta la actualidad de los factores usados para describir el análisis matemático en el funcionamiento de la generación e interacción que tiene dicha generación con la red de distribución, para que se permita de forma clara implementación de los factores más relevantes.

Desarrollo matemático: Se hace el análisis de un modelo matemático para el aerogenerador partiendo de la energía cinética del viento y su posterior conversión a potencia eléctrica, luego para el modelo de la celda de combustible y el electrolizador se toma la ley de Faraday de electrólisis. Todo lo anterior, tomando las características de cada uno de los componentes para su debido funcionamiento, así como la interacción en la unión de los dos modelos para completar el sistema híbrido y su comportamiento con la red eléctrica.

1.6.2 Implementación de investigación, adaptación y finalización de proyecto.

En este punto se planea implementar las investigaciones que se hayan realizado para el debido manejo de datos y desarrollo matemático en el modelado de los dos tipos de generación eléctrica, también como el modelado de la interacción de los mismos con la red eléctrica de distribución.

Modelado de generación eléctrica renovable: Teniendo en cuenta la recolección de datos y su debido análisis se procede a la aplicación en el modelado de los diferentes generadores renovables, independientemente el uno del otro, y luego aplicar los dos modelos en un programa de flujos de potencia para observar y analizar su respuesta.

Se realizará una comparación de resultados con casos de estudios previamente realizados y en lo posible con datos reales para verificar la validez de los resultados y poder proceder a aplicar dichos modelos en una aplicación de mayor magnitud.

Análisis de flujo de energía con inyección de generación eléctrica renovable: Para este punto se planea considerar un sistema de red eléctrica en el cual se aplique la inyección de energía eléctrica renovable, para ello se considera el modelado de una red eléctrica de prueba, en este caso la red de 5 nodos de la IEEE con modificación en las demandas, para luego implementar en el mismo los modelos de generación eléctrica renovable creados con anterioridad. Inicialmente todo se implementará a un caso base.

En este punto también es de gran importancia tener en cuenta las diferentes variables que pueden afectar un sistema e implementarlas no solo al caso base sino a diferentes casos que se puedan dar, empezando por los más probables en ocurrir.

Se van a desarrollar modelos matemáticos de fuentes de energías alternas (eólica e hidrógeno) las cuales se van a incluir en una formulación de flujos de potencia basado en balance de potencia, al solucionar el programa de flujos de potencia se van a encontrar de forma simultánea las variables de estados de la red como magnitud y ángulo de voltaje en los nodos, así como las potencias de manejadas por las líneas de transmisión, la potencia de generación inyectada a la red por parte de los generadores y variables de la fuente eólica tales como coeficiente de potencia, densidad del aire y velocidad del viento corregida según la altura del aerogenerador, potencia reactiva del aerogenerador al igual que la potencia activa generada por cada una de los elementos que conforma el sistema híbrido.

Para lo anterior se va a hacer un flujo de potencia continuo en el cual se va a tomar como dato la variación en el tiempo de la generación eólica y de la demanda.

1.7 CONTRIBUCIONES DE LA TESIS

Las contribuciones de este trabajo de tesis son:

- Modelo de los diferentes componentes del sistema híbrido, generador eólico, electrolizador y celda de combustible por separado.

- Los modelos de los componentes del sistema híbrido (eólico, electrolizador y FC) en Matlab ® se acoplaron en un solo modelo.
- Codificación del modelo del sistema híbrido en Matlab ® acoplado al programa de análisis de flujos de red eléctrica trifásica.
- Se presenta una herramienta de análisis del sistema híbrido con conexión a la red eléctrica que permite realizar flujos de potencia y acople con otros sistemas de generación y tecnologías de generación tanto existentes como futuras.

1.8 PUBLICACIONES

Los resultados obtenidos en el proyecto han sido documentados para su publicación y/o presentación en congreso internacional, presentado a continuación:

- *Modelo Avanzado de Sistema Eólico-Hidrógeno, Integrando Celdas de Combustible*, RVP-AI/2013. IEEE sección México. Vigésimosexta reunión internacional de verano de potencia, aplicaciones industriales y exposición industrial. México, Julio de 2013.
- *Advanced Model Eolic-Hydrogen System with Fuel Cell Integrated*, a someterse en el WWEC 2014. 13th World Wind Energy Conference & Renewable Energy Exhibition, Abril de 2014.

1.9 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el **Capítulo 1** se presenta una introducción acerca de lo que consiste el proyecto de investigación, lo que se pretende hacer en el mismo, así como una reseña del porque se lleva a cabo. Además, se incluyen las diferentes investigaciones relacionadas a los sistemas híbridos y más específicamente a su importancia y necesidad.

En el **Capítulo 2** se enseñan los elementos esenciales del sistema híbrido eólico-hidrógeno con integración de la celda de combustible, se explica en detalle el significado de la energía eólica, así como lo que ésta representa, su importancia y actual producción, las partes que la componen, las características y estudios a tener en cuenta para su implementación. También se explica el porqué de la implementación del hidrógeno en el modelo híbrido de este proyecto de investigación, sus características químicas, extracción como elemento químico para su posterior utilización por medio de la electrólisis, así como los tipos de electrolizadores y sus características de almacenamiento y distribución. Por otra parte, se expone la celda de combustible como medio de generación eléctrica, su funcionamiento interno, los tipos de celdas de combustible existente al igual que algunas ventajas y desventajas de las mismas. Y por último se hace una reseña del sistema híbrido en su totalidad y su funcionamiento e implementación.

En el **Capítulo 3** se explica el modelado del sistema híbrido parte por parte, la implementación del mismo al caso de estudio y se exponen los resultados obtenidos a partir del análisis de flujos de potencia con el modelo del sistema híbrido implementado en el mismo, así como también se muestran

los resultados del modelo de la celda de combustible, en cuanto al combustible (hidrógeno) requerido para la generación eléctrica. Y por último se procede a hacer una comparación de los resultados obtenidos mostrando las ventajas encontradas.

En el **Capítulo 4** se dan las conclusiones y aportaciones a las que se llegaron en este trabajo de investigación, así como las perspectivas de trabajos futuros.

1.10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EERE. (2010). *Hydrogen and Fuel Cell Technologies Program: Fuel Cells Fact Sheet*. USA. U.S Department of Energy – Energy Efficiency & Renewable Energy (EERE), Fact sheet produced by the Fuel Cell Technologies Program describing hydrogen fuel cell technology.
- [2] Zhang Y., Zhou M., and Li G. (2010). *Wind power price regulation considering wind power fluctuation*. IEEE. Critical Infrastructure (CRIS), 5th International Conference. (pp. 1-4). ISBN 9781424480807
- [3] Karki, R.; Billinton, R. and Thapa, S. (2011). *Evaluation of wind power commitment risk in system operation*. IEEE. Electrical Power and Energy Conference (EPEC). (pp. 284-289) ISBN 9781457704055
- [4] Ángeles-Camacho C. y Bañuelos F. (2011). *Incorporación de un modelo de generador eólico al análisis de flujos dinámicos de potencia*. Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. 12, Núm. 3, (pp. 311-320). ISSN 1405-7743 FI-UNAM
- [5] Tapia A., Tapia G., Ostolaza J. and Saenz J. (2003). *Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator*. IEEE. Energy Conversion, IEEE Transactions. Vol. 18, Issue 2. (pp. 194-204). ISSN 08858969
- [6] Roney, M. (2013, 4, 18). *Wind surpasses nuclear in China*. Earth Policy Institute. Recuperado de http://www.earth-policy.org/data_highlights/2013/highlights35.
- [7] Van Vorst W., Barbir F. (2011). *Energy Carriers And Conversion Systems - Hydrogen as a transport fuel: Past and Present Usage*. UK. Eolss Publishers Co. Ltd, (pp. 1-25) ISBN 9781905839308
- [8] Dicks A., Diniz da Costa J., Simpson A., and McLellan B. (2004). *Fuel cells hydrogen and energy supply in Australia*. Elsevier. Journal of Power Sources. Vol. 131, Issues 1-2. (pp. 1-12). ISSN 0378-7753
- [9] Yan Z., Gu W. (2010). *Research on integrated system of non-grid-connected wind power and water-electrolytic hydrogen production*. IEEE. World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference (WNWEC). (pp. 1-4). ISBN 9781424489213

ELEMENTOS ESENCIALES DEL SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-HIDRÓGENO CON INTEGRACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE

2.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo sustentable puede ser ampliamente definido como generación, producción y consumo en una manera que satisfaga las necesidades del presente, sin comprometer la posibilidad de futuras generaciones a cubrir sus propias necesidades. Se ha convertido en un principio de guía clave en la política del siglo XXI. De manera global, políticos, industrias, ambientalistas y economistas afirman que el principio debe ser aplicado a nivel internacional, nacional y local. [1]

En el contexto internacional, la palabra “desarrollo” hace referencia a mejorar la calidad de vida, y especialmente, el estándar de vida en los países subdesarrollados del mundo. El propósito del desarrollo sustentable es para alcanzar un mejoramiento, mientras se mantiene el proceso ecológico del que depende la vida.

La generación de energía eléctrica puede ser dividida en dos clases, la energía renovable y la no renovable. La primera hace referencia a la energía obtenida de flujos naturales y persistentes de energía que ocurren en el medio ambiente. Dicha energía también suele ser llamada “energía verde” o “energía sustentable”. La segunda es la energía obtenida de almacenes permanentes de energía que se encuentra de forma subterránea a menos que sea extraída por medios creados por el hombre. Note que la energía es inicialmente un potencial de difícil acceso, y acciones externas son requeridas para extraer dicha energía e iniciar el abastecimiento de energía para propósitos prácticos. Para evitar el uso del nombre “no renovable”, tal tipo de energía es también llamada “energía café”, “suministro finito” o “convencional”. En el apéndice A se mencionan varios tipos de generación con energías renovables, sistemas híbridos, así como la importancia y la capacidad instalada de cada uno de ellos.

La Tabla 2.1 muestra los combustibles no-renovables, los cuales no están siendo renovados a una tasa significativa, y por tanto, la reserva presente es finita. La localización y cantidad de dicha reserva depende de los últimos peritajes. Claramente los tipos dominantes de combustibles fósiles son el carbón, seguido por el petróleo y por menos el gas. El tiempo de vida de la reserva de un recurso puede estar definido como la cantidad accesible conocida dividida por la tasa de uso presente. Por esta definición, el tiempo de vida de los recursos de petróleo y gas es usualmente solo de unas pocas décadas; mientras que el tiempo de vida del carbón es de unos pocos siglos.

Tabla 2. 1 Recursos energéticos no-renovables de la tierra [2].

<i>Fósiles</i>	<i>Nucleares</i>
Carbón	Fusión
Petróleo	Fisión
Gas	
Esquisto ¹	

Por otro lado, el abastecimiento de energías renovables, como las presentadas en la Tabla 2.2, son mucho más compatibles con el desarrollo sustentable debido a que son fuentes inagotables de energía a diferencia de los combustibles nucleares y fósiles. Consecuentemente casi todas las plantas de energía renovable incluyen cuatro factores vitales para mejorar o mantener el beneficio social de energía [3]:

- Incremento en el aprovechamiento de recursos renovables
- Incremento eficiente de abastecimiento y uso final.
- Reducción de polución.
- Consideración del estilo de vida.

Tabla 2. 2 Fuentes de energía renovable [4].

<i>Fuente Primaria</i>	<i>Medio</i>	<i>Conversión Natural</i>	<i>Conversión Técnica</i>
Sol	Agua	Evaporación, precipitación, fusión	Plantas hidroeléctricas
	Viento	Flujo de aire atmosférico	Conversión de energía del viento
		Movimiento de Ondas	Planta de energía de las Olas
	Energía Solar	Corriente del Océano	Planta de energía del Océano
		Calentamiento de la superficie de la tierra y atmosfera	Unidades de potencia térmica, bombas de calor
		Radiación Solar	Conversión fototermica, Conversión termoeléctrica, Conversión fotoiónica
	Biomasa	Producción de Biomasa	Plantas de Cogeneración
Tierra	Decaimiento de Isotopos	Calor Geotérmico	Plantas de Cogeneración
Luna y Sol	Gravitacional	Olas, mareas	Plantas de energía de las mareas

A continuación se describen los componentes del sistema híbrido eólico-hidrógeno con integración de la celda de combustible, inicialmente se hace referencia a las partes tanto físicas como datos

¹ Esquisto: Roca metamórfica de minerales laminares como mica, grafito... de la cual se puede extraer el gas de esquisto (una forma de gas natural) y aceite de esquisto (puede sustituir al petróleo en varias aplicaciones).

característicos más relevantes que componen el sistema de generación de energía eólica, luego se expone el electrolizador como medio de generación de hidrógeno y algunas formas en la que el hidrógeno puede ser almacenado, luego se describe la celda de combustible como instrumento para producir energía eléctrica a partir del hidrógeno, los tipos de celdas de combustibles, y por último, se expone el sistema híbrido en su totalidad.

2.2 DEFINICIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS

Un sistema es la unión de uno o más elementos que interactúan entre sí para llegar a una finalidad común. Híbrido es la combinación de dos o más tecnologías, razas, especies, etc., siendo el caso que se plantea en este trabajo, se hace referencia a la unión de dos sistemas de generación eléctrica por medio de energías renovables, estas tecnologías de energías renovables pueden ser consideradas parte del desarrollo sustentable.

Los sistemas híbridos de potencia, están diseñados para la generación de energía eléctrica. Por lo general son independientes de grandes redes eléctricas centralizadas y son usadas en áreas remotas. Los sistemas híbridos por definición, contienen una combinación de dispositivos de generación eléctrica como turbinas eólicas, fotovoltaicas, micro-hidro y/o generadores basados en combustibles fósiles. Un sistema de energía híbrido usualmente consiste de dos o más fuentes de energías renovables usadas en conjunto para proveer un incremento en la eficiencia del sistema, también como mayor disponibilidad para el abastecimiento de energía. Los sistemas de energía híbridos van desde pequeños sistemas diseñados para una o varias casas a muy grandes para redes de islas remotas o grandes comunidades.

El funcionamiento de un sistema híbrido se deriva del funcionamiento por separado de los sistemas de generación de energía renovable a utilizar, donde los sistemas se unen en uno solo para cubrir las carencias o desventajas que presentan por separado, siendo esta en muchos casos la intermitencia en la producción de energía eléctrica según el recurso renovable que se esté utilizando como energía primaria.

Algunos ejemplos básicos de desventajas de intermitencia es el caso de la generación derivada por la energía del Sol, esto debido a que el aprovechamiento para la generación eléctrica se reduce a unas cuantas horas al día en la que el Sol se encuentre a vista y los rayos puedan llegar al sistema de generación eléctrica en la tasa requerida. Otro sistema que presenta desventajas de intermitencia, es la generación derivada de la energía del viento, donde se debe tener en cuenta que se requiere que el viento tenga una cierta velocidad para empezar a generar electricidad y que la dirección del mismo es variable.

Teniendo en cuenta la localización donde se requiera la generación eléctrica ya sea en pequeña o gran escala, se recurre a la evaluación de las características y factores que más se acomodan a cierto tipo de generación, según la que presente mayor eficiencia, se escoge uno o más tipos de fuentes primarias las cuales se puedan aprovechar.

En el caso de varios tipos de fuentes primarias a aprovechar para la generación, se trata de que compaginen entre sí y que entre ellas se pueda llevar un mejor aprovechamiento en la transformación de su energía natural a energía eléctrica. En algunos casos, un sistema puede funcionar como respaldo

para el otro cuando este no está generando ningún o poco valor de salida. En otros más, se recurre a formas de almacenamiento poco o libres de contaminantes, siendo este el caso del hidrógeno.

2.3 PROPÓSITO DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS BASADOS EN ENERGÍAS RENOVABLES

Debido al actual crecimiento poblacional, cada vez se ocupa más energía eléctrica [5], siendo que en lugares rurales o de gran lejanía a la red eléctrica, difícil o económicamente alto el hacer nuevas conexiones, en estos casos, muchas veces es mejor tener una estación eléctrica que cubra las necesidades de dichas cargas, siendo entonces la mejor opción la construcción de un sistema híbrido basado en energías renovables sin hacer conexión a la red eléctrica pública, donde el aprovechamiento y las ventajas que estos sistemas conllevan son altos.

Existen varios propósitos por el cual implementar sistemas de generación eléctrica basados en recursos renovables, el que podría ser considerado el propósito inicial de los sistemas híbridos es la disminución de contaminación, debido a los problemas actuales en el medio ambiente derivados de la contaminación así como la disminución sustancial de los recursos no renovables.

Otro de los propósitos es que actualmente se considera el estilo de vida tanto actual como a futuro, donde se pretende preservar y mejorar las condiciones ecológicas y ambientales. En la Tabla 2.3 se muestran algunos beneficios del uso de electricidad renovable.

Tabla 2. 3 Beneficios del uso de Electricidad Renovable [6].

<i>Beneficios Tradicionales</i>	<i>Beneficios no-tradicionales Por millón kWh consumido</i>
Valor monetario de kWh consumido U.S. promedio de 12 centavos/kWh U.K. promedio de 7.5 peniques/kWh	Reducción de emisión 750-1000 toneladas de CO ₂ 7.5-10 toneladas de SO ₂ 3-5 toneladas de NO _x Reducción de 50,000 kWh en pérdida de energía en líneas de potencia y equipo. Extensión de vida útil en equipo de distribución de potencia. Menos costo de capital entre más bajo la capacidad del equipo pueda ser usado (como la reducción de capacidad de un transformador de 50kW por MW instalado)

Un ejemplo comparativo es que mientras los combustibles fósiles convencionales y las plantas de energía nuclear, que constituyen el 78% de la producción mundial de electricidad, usan el agua para el enfriamiento y la condensación del vapor que mueve las turbinas, la generación de energía a partir del viento no requiere prácticamente agua. Esto permite a la energía eólica ahorrar más de 2,000 litros de agua por MWh de electricidad producida. También se observa que muchas regiones del mundo, que se enfrentan, o lo harán en un futuro, a la escasez de agua, cuentan a su vez con el viento adecuado para poder generar energía a partir de esta fuente renovable [6].

2.4 ENERGÍA EÓLICA

El primer uso de la potencia eólica fue en la navegación de barcos en el Nilo, aproximadamente 5000 años atrás. Los europeos lo usaron para moler granos y bombear agua en los siglos XVI y XVII como el que se observa en la Figura 2.1. El primer molino de viento para generar electricidad en USA fue instalado en 1890, hoy día, grandes plantas de potencia eólica están compitiendo con las centrales eléctricas en el suministro de potencia limpia y económica en muchas partes del mundo.



Figura 2. 1 Molino de viento de hojas de acero bombeando de agua en el medio oeste norteamericano (finales de 1800) [7]

El tamaño de turbina promedio de las instalaciones de viento ha sido de 300 kW hasta hace poco [6]. Nuevas máquinas de capacidad de 500 a 4,100 kW [8] se han desarrollado y están siendo instaladas. La Figura 2.2 muestra una turbina eólica moderna de varios megawatts para la generación de energía en aplicaciones de gran escala, en esta se pueden observar sus principales componentes.

La mejora en el diseño de turbinas y utilización de plantas ha contribuido a un descenso en gran escala en el costo de la generación de energía eólica de 35 centavos por kWh en 1980 a menos de 5 centavos kWh en 1997 [6]. En los últimos años, ha crecido la demanda de turbinas, por lo tanto los fabricantes han podido bajar los precios a tal punto que le están haciendo competencia al carbón. En regiones de Brasil, México y USA el precio de la energía eólica es de US\$68/MW mientras que el carbón cuesta US\$67/MW. Mientras tanto el gas natural es lo más barato costando US\$56/MW [9]. A este precio, la energía eólica se ha convertido en una de las fuentes de electricidad menos costosas. Otros factores que han llevado al aceleramiento en la tecnología de potencia eólica son [6]:

- Alta resistencia de compuestos de fibra para construcción de grandes palas a bajo costo.
- Descenso de precios en electrónica de potencia.
- Operación de velocidad variable de generadores eléctricos para capturar la máxima energía.
- Mejoramiento en el plan de operación, llevando la disponibilidad hasta un 95%.

- En la escala de la economía, las turbinas y plantas se están haciendo más grandes en tamaño y energía generada.
- Experiencia en campo acumulada (el entendimiento del efecto de la curva) mejorando el factor de planta.



Figura 2. 2 Turbina eólica moderna para generación de energía a gran escala [6]

La energía disponible en el viento varía al cubo de la velocidad del viento, por lo que un entendimiento de las características del recurso eólico es crítico en todos los aspectos de la explotación de la energía eólica, desde la identificación de locaciones adecuadas y predicciones de la viabilidad económica del proyecto de parque eólico mediante el diseño de los mismos aerogeneradores, y entendiendo el efecto de esta generación en la red eléctrica y sobre los consumidores.

Desde el punto de vista de la energía eólica, la característica más relevante del recurso eólico es la variabilidad. El viento es altamente variable, tanto en el sentido geográfico como temporal. Además esta variabilidad persiste en un gran rango de escalas, en espacio y tiempo. La importancia de esto es amplificado por la relación cúbica del viento con la generación eléctrica, debido a que un leve cambio en la velocidad del viento, ocasiona un cambio radical en la potencia eléctrica de salida del aerogenerador por ésta relación cubica.

La heterogeneidad de la superficie terrestre, con su patrón de masas de tierra y océanos, asegura que el patrón de circulación global es perturbado por variaciones en menor escala en proporciones continentales. Estas variaciones interactúan de manera altamente compleja y no-lineal, para producir un resultado incierto, el cual es producto de lo impredecible del clima en localizaciones particulares. Sin embargo, existen tendencias ayudan a pronosticar diferencias climáticas entre regiones [10].

Colinas y montañas dan lugar a regiones locales de mayor velocidad de viento, debido en parte a la altitud de la capa de la tierra, esto es, generalmente la velocidad del viento se incrementa con la altura sobre el nivel del mar, de tal manera que en cumbres y picos de montañas se pueden llegar a tener los más altos niveles de velocidad de viento. También debido en parte a la aceleración del flujo del viento sobre y alrededor de las colinas y montañas, y a través de pasos (forma de efecto túnel) o a lo largo de valles alineados con el flujo. Igualmente, la topografía puede producir áreas que reducen la velocidad del viento, tales como valles escudados, áreas en el sotavento² de la cresta de montaña o donde el patrón de flujo resulta en puntos de estancamiento [10].

El estimado del recurso eólico en México está en el orden de 10,000 MW con capacidad de factor de planta del 40% o más. Un número de zonas con potencial para explotación de viento para generación eléctrica ha sido identificado en el istmo³ de Tehuantepec (en el estado de Oaxaca) y La Rumorosa en Baja California, en el estado de Zacatecas, Hidalgo, Veracruz, y Sinaloa, así como en la Península de Yucatán. [11, 12].

En el año 2012 se observó un incremento en la capacidad eólica instalada. De 569 MW al final del 2011, a un salto total de cerca de 1,370 MW para el final de 2012 [11].

La Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) estima el potencial de energía eólica en el país de alrededor de 30 GW, el cual incluye lugares con factor de capacidad sobre el 25%, de estos, 21 GW están sobre 30% y 16 GW en el rango de 35% al 45% [12].

Un objetivo nacional de energía eólica de 12 GW para el 2020 es factible, sin embargo aún está por determinarse el objetivo oficial [11].

En la Figura 2.3 se observa la capacidad de energía eólica instalada a nivel mundial por regiones.

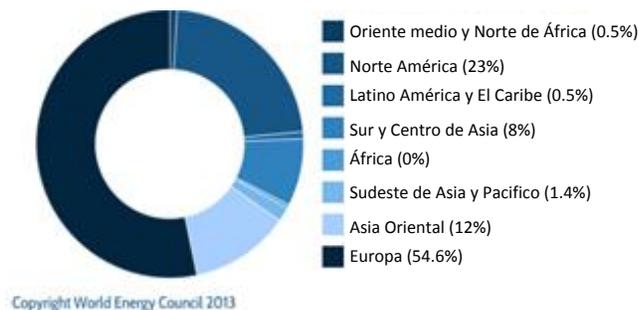


Figura 2. 3 Capacidad Eólica instalada a nivel mundial por región [11]

²Sotavento: Término de la marinería que alude al lugar desde donde sopla el viento, el lado de sotavento es el lado protegido del viento.

³Istmo: Franja estrecha de tierra que une, a través del mar, dos áreas mayores de tierra, en general con orillas a ambos lados

La energía eólica es usada para accionar el molino de viento, que a su vez acciona un generador para producir electricidad. El molino de viento, convierte la energía cinética del movimiento del aire en movimiento mecánico que puede ser usado ya sea directamente para accionar el generador y producir electricidad, existen varios tipos:

- De eje horizontal, como los de la Figura 2.4:
 - Tipo multi-palas
 - Tipo vela
 - Tipo hélice

- De eje vertical, mostrados en la Figura 2.5:
 - Tipo Savonius
 - Tipo Darrieus

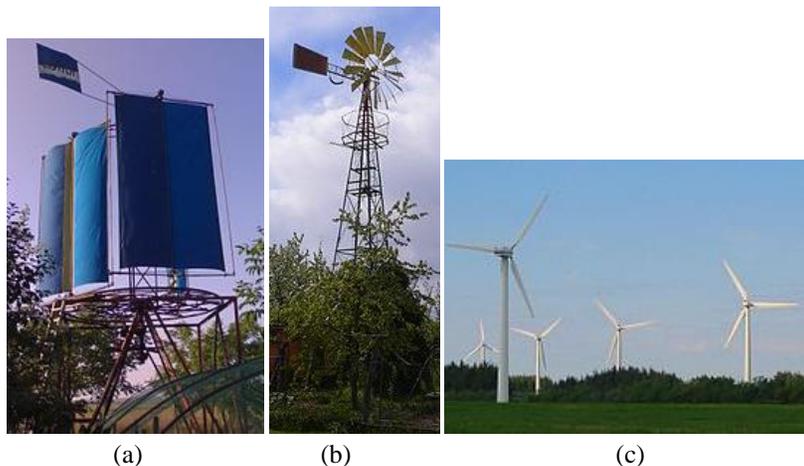


Figura 2. 4 Turbinas de eje horizontal. (a) Vela. (b) Multi-pala. (c) Hélice

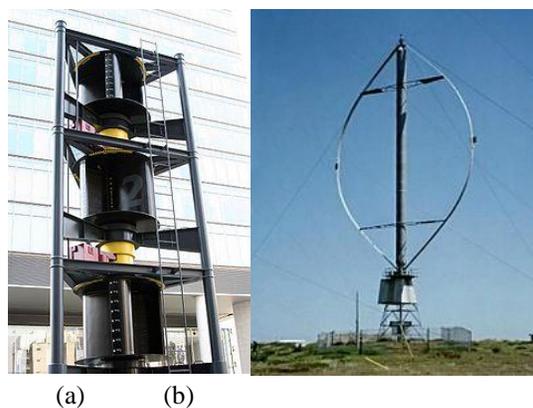


Figura 2. 5 Turbinas de eje vertical. (a) Savonius. (b) Darrieus

Los aerogeneradores de eje vertical son de diseño simple en comparación con los de eje horizontal. Estos últimos pueden ser de una sola pala, dos palas o multi-pala. Dispositivos de conversión de energía eólica son comúnmente conocidos como turbinas eólicas porque convierten la energía de la corriente del viento en energía de rotación: el componente que gira se llama rotor. Aunque los términos

turbina y rotor son a menudo considerados sinónimos. Un generador eléctrico está acoplado a la turbina para producir energía eléctrica.

La velocidad del viento tiende a ser muy variable, debido a esto, el desafío básico es la integración de este sistema con la red eléctrica, por lo que consiste en dos aspectos [13]:

- Cómo mantener un nivel de voltaje aceptable para todos los consumidores del sistema de potencia: los consumidores deben ser capaces de seguir utilizando el mismo tipo de aparatos que están acostumbrados.
- Cómo mantener el balance de potencia del sistema: Es decir, como puede la producción de energía y otras unidades de generación alcanzar continuamente las necesidades de los consumidores.

Cuando turbinas eólicas o parques eólicos son conectados a la red eléctrica local, hay ciertas consideraciones a tener en cuenta en relación con el control local de voltaje y al funcionamiento del sistema durante desórdenes en el mismo.

Normalmente, los parques eólicos están conectados a la red de voltaje medio. La Figura 2.6 muestra una conexión típica de un parque eólico de 5.2 MW compuesto por trece turbinas eólicas de 400 kW cada una. Todas las turbinas están equipadas con generadores asíncronos (inducción), que son muy robustos. El uso de estos generadores significa que no hay problemas de estabilidad sincrónica (estabilidad transitoria) ya que este problema se limita a los generadores sincrónicos.

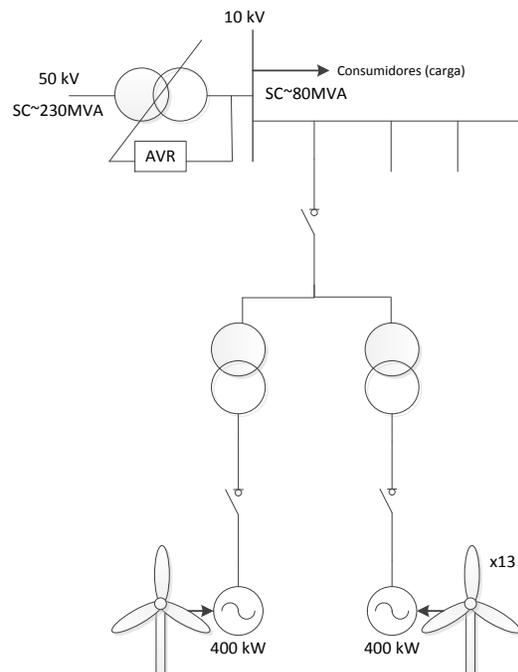


Figura 2. 6 Conexión típica de parque eólico [14]

Los generadores asíncronos -como los motores- normalmente deben ser conectados a una red común que pueda suministrarle la corriente de magnetización al generador (potencia reactiva).

Algo a tener en cuenta es que las turbinas eólicas individuales no deberán ser compensadas en potencia reactiva en más que la absorción de potencia reactiva en operación ociosa (sin carga) para reducir sobre-voltajes en caso de desconexión de la turbina eólica de la red [14].

Es preferible que la potencia reactiva sea producida en las turbinas eólicas individuales. De común acuerdo, los distribuidores en Dinamarca exigen que las turbinas eólicas estén equipadas con un capacitor, que se conecta o se desconecta simultáneamente con el generador [14].

Ha habido ciertas dudas en cuanto a que si turbinas eólicas equipadas con capacitores podrían energizar una red aislada. Ello no ha sido observado en la práctica y es improbable que ocurra. Si el voltaje y la frecuencia se supone que están entre límites normales, debe existir un balance entre la producción y el consumo de potencia activa como así también de la potencia reactiva, pero ello es solo posible por escasos segundos a causa del inconstante viento.

Un problema más serio es el riesgo de sobre-voltajes generados por turbinas eólicas aisladas, antes de que se desconecten. Los sobre-voltajes pueden ocurrir si la carga es menor que la potencia producida por las turbinas eólicas. En esa situación las turbinas eólicas se acelerarán y la frecuencia se elevará. El efecto de ello será que los generadores necesitarán menos potencia reactiva para recibir la excitación y los capacitores incrementarán la producción de potencia reactiva. Si la frecuencia continua elevándose, el generador se sobreexcitará y tendrá lugar el sobre-voltaje. Sobre-voltajes dañinos pueden evitarse eligiendo un moderado grado de compensación y una desconexión fija de la red cuando el voltaje o la frecuencia están fuera de los límites normales [14].

En México la capacidad instalada para finales del 2012 fue de 1,000 MW, la Figura 2.7 muestra las capacidades de producción que se obtuvieron en México desde el 2004 hasta el 2011 [15].

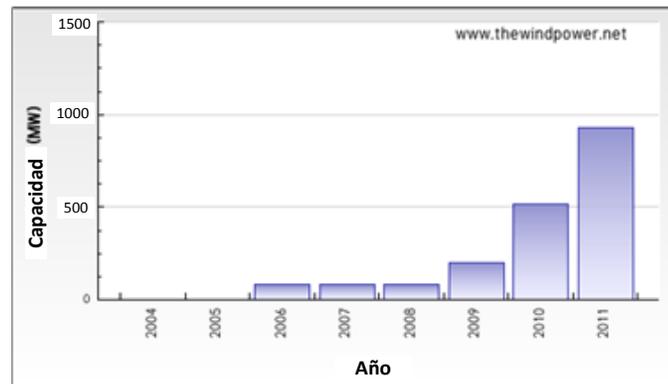


Figura 2. 7 Capacidad de producción eólica en México [15].

Se debe entender el comportamiento y algunas características del viento debido a que son impulsados casi totalmente por la energía del Sol, existiendo un calentamiento distinto en diferentes superficies. El calentamiento es más intenso en masas de tierra más cercanas a la línea del ecuador, y obviamente el mayor calentamiento ocurre en horas del día, lo que significa que la región con gran calor se mueve alrededor de la superficie de la tierra a medida que gira sobre su eje. El aire cálido se eleva y circula en la atmosfera para hundirse en las superficies de zonas más frías. El resultado del movimiento a gran

escala del aire es fuertemente influenciado por fuerzas de Coriolis⁴ debido a la rotación de la tierra. El resultado es un patrón de circulación a escala global. Ciertas características identificables de esto como los vientos alisios y los “cuarenta rugientes” son bien conocidos [10].

2.4.1 Variaciones de velocidad de viento a largo plazo

Existe evidencia de que la velocidad del viento en una zona en particular puede ser sujeto de variaciones muy lentas a largo plazo. Aunque la disponibilidad de registros históricos precisos es una limitante, análisis cuidadosos como los de Palutikoff, Guo y Halliday en 1991, han demostrado claras tendencias. Claramente estos pueden ser relacionados con variaciones de temperatura a largo plazo para lo cual hay una amplia evidencia histórica. Hay también mucho debate actual acerca de los posibles efectos del calentamiento global, causado por la actividad humana, sobre el clima, y esto indudablemente afectará el clima del viento en las próximas décadas.

Aparte de estas tendencias de largo plazo, puede haber cambios considerables en la velocidad del viento y disponibilidad del recurso eólico en un lugar determinado de un año al siguiente. Estos cambios tienen muchas causas. Pueden ser relacionados a fenómenos climáticos globales como el fenómeno del niño, cambios en partículas atmosféricas provenientes de erupciones volcánicas, y actividad de manchas solares, por nombrar algunas. Estos cambios se suman de manera significativa a la incertidumbre en la predicción de la energía producida por un parque eólico en un lugar en particular durante su tiempo de vida proyectado [10].

2.4.2 Selección del lugar para el aerogenerador

Los siguientes factores deben ser considerados en una localización de un sistema de conversión de energía eólica (WECS – *Wind Energy Conversion Systems*). Máquinas de conversión de energía deben ser instaladas en sitios donde los vientos son fuertes y persistentes. Los lugares más adecuados para turbinas eólicas se encuentran donde el promedio anual de velocidad de viento son moderadamente altos.

Un sitio ideal sería donde un viento estable y suave fluya todo el tiempo. Es preferible instalar WECS en altitudes altas ya que los vientos tienden a tener mayores velocidades. La condición del terreno en el sitio debe ser tal que las bases del WECS sean aseguradas. El costo del terreno debe ser bajo. Problemas de formación de hielo, niebla salina o soplos de polvo no deben estar presentes en el sitio ya que afectan las palas del aerogenerador. El sitio debe estar cerca de la red eléctrica. El sitio debe ser cerca de la carretera o vía de instalaciones [1].

Para predicciones de viento, las mediciones de velocidad de viento tienden a ser medidas solo a una altura estándar de 10 m, y en estaciones cerca de aeropuertos o pueblos donde la protección contra el viento puede ser característica natural del sitio. Por lo tanto, para predecir las condiciones de potencia del viento en un lugar específico, datos meteorológicos estándar de viento de la estación más cercana solo son útiles para proporcionar estimaciones de primer orden, pero no son suficientes para la planificación detallada.

⁴ El efecto Coriolis hace que un objeto que se mueve sobre el radio de un disco en rotación tienda a acelerarse con respecto a ese disco según si el movimiento es hacia el eje de giro o alejándose de éste.

Usualmente, mediciones cuidadosas de todo el sitio propuesto son necesarias en varios lugares y alturas de varios meses a un año. Estas mediciones detalladas pueden entonces ser relacionadas a los datos meteorológicos estándar, y proveer una comparación base a largo plazo. Además, la información se lleva en los bancos de datos especializados de energía eólica que se obtienen de mediciones de aviones [3].

2.4.3 Medición y Evaluación del Viento

El viento es una fuente limpia y renovable de energía. Para convertir el viento en electricidad primero es necesario saber su velocidad, ya que la cantidad de energía eólica que se genera depende de ésta, antes de instalar un molino de viento o aerogenerador, se debe determinar la dirección y velocidad del viento. Las mediciones de viento se utilizan en muchas áreas, por ejemplo, para el boletín meteorológico, para la meteorología agraria, para propósitos industriales o para diferentes áreas de la ciencia. Todas estas aplicaciones tienen sus propias condiciones, por tanto, necesitan una tecnología que las tenga en cuenta.

La grabación de los datos debe durar, al menos, 12 meses sin interrupciones, ya que, a corto plazo, las pérdidas de datos, no son fáciles de manejar. La elección de los sensores y la instalación de los sistemas de medición, es fundamental para obtener medidas precisas. Los errores en este campo tienen como consecuencia que la totalidad de los datos no puedan evaluarse apropiadamente.

El viento se mide con un anemómetro, que es el instrumento que se utiliza para medir la velocidad del viento. Es muy parecido a un molino de tres aspas separadas por un ángulo de 120° que son movidas alrededor de un eje vertical. Al ser golpeado por el viento enciende un contador que marca, con base al número de revoluciones, la velocidad del viento que hay.

Para determinar la dirección del viento se usan, cada vez más, los sensores potenciométricos (veleta), porque la resolución de 1° es excelente y requieren un consumo pequeño. Se debe tener en cuenta que la señal de salida tiene que cubrir el área completa (360° grados) sin huecos.

A la hora de realizar pronósticos energéticos también se tienen en cuenta la presión atmosférica y la temperatura del aire, aunque su influencia es muy baja, por ello, la precisión de este tipo de herramientas de medición está en un segundo plano.

Distribución de Weibull

Es un modelo general de las variaciones en la velocidad del viento. Para la industria eólica es muy importante ser capaz de describir la variación de las velocidades del viento. Los proyectistas de turbinas necesitan la información para optimizar el diseño de sus aerogeneradores, así como para minimizar los costos de generación. Los inversionistas necesitan la información para estimar sus ingresos por producción de electricidad.

Si se miden las velocidades del viento a lo largo de un año se observará que en la mayoría de áreas los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos frescos y moderados son bastante comunes.

La variación del viento en un emplazamiento típico suele describirse utilizando la llamada Distribución de Weibull, Figura 2.8. Este emplazamiento particular tiene una velocidad media del viento de 7 metros por segundo.

La Figura 2.8 muestra una distribución de probabilidad. El área bajo la curva siempre vale exactamente 1, ya que la probabilidad de que el viento sopla a cualquiera de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100 por cien.

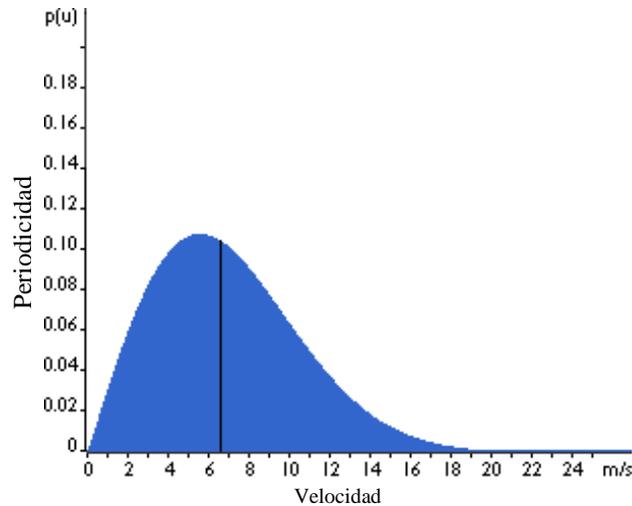


Figura 2. 8 Distribución Weibull

La mitad del área bajo la curva está a la izquierda de la línea negra vertical a 6.6 metros por segundo. Los 6.6 m/s son la mediana de la distribución. Esto significa que la mitad del tiempo el viento soplará a menos de 6.6 m/s y la otra mitad soplará a más de 6.6 m/s.

¿Entonces porqué se dice que la velocidad del viento media es de 7 m/s? La velocidad del viento media es realmente el promedio de las observaciones de la velocidad del viento que tendremos en ese emplazamiento. La distribución de las velocidades del viento es sesgada, es decir, no es simétrica. A veces tendrá velocidades de viento muy altas, pero son muy raras. Por otro lado, las velocidades del viento de 5.5 m/s son las más comunes. Los 5.5 m/s es el llamado valor modal de la distribución. Si se multiplica cada diminuto intervalo de la velocidad del viento por la probabilidad de tener esa velocidad particular, y se suman todos, se obtiene la velocidad del viento media.

La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie. Por lo tanto, la distribución de Weibull puede variar tanto en la forma como en el valor medio.

Si el parámetro de forma es exactamente 2 (el parámetro de forma se observa en la Figura 3.4), como en la Figura 2.8, la distribución es conocida como distribución de Rayleigh. Los fabricantes de aerogeneradores proporcionan gráficas de rendimiento para sus máquinas usando la distribución de Rayleigh [16].

La Rosa de los Vientos

La dirección del viento hace referencia a la orientación de brújula de la que viene el viento. Los datos meteorológicos son usualmente presentados como rosa del viento. Esta información es de gran importancia para ubicar un generador eólico en región de colinas, cerca de edificios, o en conjuntos de máquinas donde pueda ocurrir el bloqueo del viento. Los cambios en la dirección del viento pueden ser de hasta 30° por segundo, estos cambios rápidos, por ejemplo en terreno montañoso, pueden dañar un aerogenerador más que un cambio brusco en la velocidad del viento [3].

Para mostrar la información sobre las distribuciones de velocidades del viento y la frecuencia de variación de las direcciones del viento, puede dibujarse la llamada rosa de los vientos como la de la Figura 2.9 basándose en observaciones meteorológicas de las velocidades y direcciones del viento.

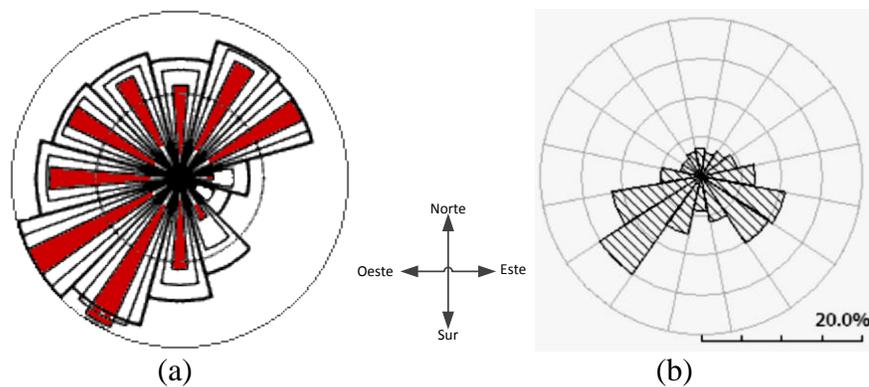


Figura 2. 9 Ejemplos Rosas del viento, (a) costa Atlántica de Francia [17], (b) Sitio en Zacatecas, México [18]

Se ha dividido la rosa en 12 sectores, abarcando cada uno 30° del horizonte (también puede dividirse en 8 o 16 sectores). El radio de las cuñas amplias (las más exteriores) proporciona la frecuencia relativa de cada una de las doce direcciones del viento, es decir, qué tanto por ciento del tiempo el viento sopla desde esa dirección.

La segunda cuña da la misma información pero multiplicada por la media de la velocidad del viento en cada dirección particular. El resultado se normaliza sumando hasta el 100 por cien. Esto indica la contribución de cada sector en la velocidad media del viento en nuestra ubicación particular.

La cuña más interior proporciona la misma información que la primera pero multiplicada por el cubo de la velocidad del viento en cada ubicación. El resultado se normaliza sumando hasta el 100 por cien. Esto indica la contribución de cada sector en la energía contenida en el viento en nuestra ubicación particular.

Teniendo en cuenta que el contenido energético del viento varía con el cubo de la velocidad del viento. Por tanto, las cuñas más interiores son en realidad las más interesantes. Indican donde encontrar una mayor potencia que impulse nuestros aerogeneradores. En este caso podemos ver que la dirección de viento dominante es la Sudoeste.

Una rosa de los vientos proporciona información sobre las velocidades relativas del viento en diferentes direcciones, es decir, cada uno de los tres grupos de datos ha sido multiplicado por un número que asegura que la cuña más larga del grupo mide exactamente lo mismo que el radio del círculo más exterior del diagrama [17].

Las rosas de los vientos varían de un lugar a otro. Son en realidad una especie de huella meteorológica. Las rosas de los vientos de las áreas vecinas son a menudo similares, por lo que en la práctica la interpolación (hallando una media) de las rosas de los vientos de las áreas circundantes puede dar resultados seguros. Pero si el terreno es complejo, por ejemplo en montañas y valles que recorren diferentes direcciones, o litorales orientados en direcciones diferentes, no es seguro en general adoptar este tipo de suposiciones [17]. Se enfatiza que la rosa de los vientos sólo indica la distribución relativa de las direcciones del viento, y no el nivel real de la velocidad media del viento.

Un vistazo a la rosa de los vientos es extremadamente útil para situar aerogeneradores. Si una gran parte de la energía del viento viene de una dirección particular, lo que deseará, cuando coloque una turbina eólica en el paisaje, será tener la menor cantidad de obstáculos posibles en esa dirección, así como un terreno lo más liso posible.

Sin embargo los modelos eólicos pueden variar de un año a otro, así como el contenido energético (normalmente alrededor de un 10%). Por lo tanto, lo más conveniente es tener observaciones de varios años para poder obtener una media fidedigna. Los proyectistas de grandes parque eólicos cuentan normalmente con un año de medidas locales y utilizan observaciones meteorológicas a largo plazo de las estaciones climáticas cercanas para ajustar sus medidas y obtener así una media a largo plazo fiable [17].

2.4.4 Potencia Extraída del Viento

La potencia real extraída por las palas del rotor es la diferencia entre los vientos de aguas arriba y aguas abajo.

$$P_o = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot \{V_i^2 - V_o^2\} \quad (2.1)$$

P_o es la potencia mecánica extraída por el rotor.

V_i es la Velocidad del viento aguas arriba, a la entrada de las palas del rotor.

V_o es la Velocidad del viento aguas abajo, a la salida de las palas del rotor.

\dot{m} es la tasa de caudal por segundo.

La velocidad del aire es discontinua de V_i a V_o en el plano de las palas del rotor en el sentido macroscópico. La tasa de caudal de aire a través de las palas rotativas es, por tanto, derivado multiplicando la densidad con la velocidad promedio [6].

El *Coficiente de potencia* del rotor (C_p) o eficiencia del rotor mostrada en la Figura 2.10, es la fracción de potencia de viento aguas arriba, el cual es capturado por las palas del rotor. La potencia restante es descargada o se pierde en el viento aguas abajo.

El coeficiente de potencia indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad. Simplemente dividiendo la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada, para medir que tan técnicamente eficiente es un aerogenerador.

La Figura 2.10 muestra la curva del coeficiente de potencia para un aerogenerador danés típico. Aunque la eficiencia media de estos aerogeneradores suele estar por encima del 20%, la eficiencia varía mucho con la velocidad del viento (pequeñas oscilaciones en la curva suelen ser debidas a errores de medición).

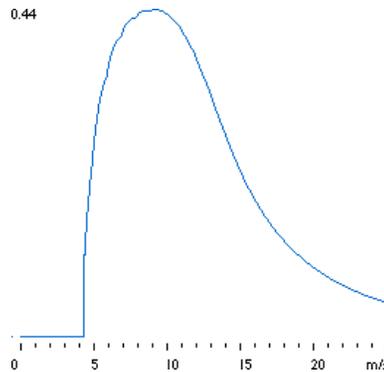


Figura 2. 10 Curva de coeficiente de potencia

La eficiencia mecánica del aerogenerador más alta (en este caso del 44%) se da a velocidades alrededor de 9 m/s. Este valor ha sido elegido deliberadamente por los ingenieros que diseñaron la turbina. A bajas velocidades del viento la eficiencia no es tan alta, ya que no hay mucha energía que recoger. A altas velocidades del viento, la turbina debe disipar cualquier exceso de energía por encima de aquella para la que ha sido diseñado el generador. Así pues, la eficiencia interesa sobretodo en la zona de velocidades de viento donde se encuentra la mayor parte de la energía.

Las características distintivas de los sistemas de generación eólica son [3]:

- La eficiencia de la turbina eólica es mayor si la frecuencia de rotación varía para mantener constante la tasa de velocidad pico, sin embargo, la generación de electricidad es más eficiente a una frecuencia constante o casi constante.
- El control mecánico de la turbina por paso de pala u otro control mecánico a potencias menores a la nominal incrementan complejidad y costo. Un método alternativo, generalmente más barato y más eficiente, pero rara vez realizado, es variar la carga eléctrica de la turbina para controlar la frecuencia de rotación.
- La frecuencia óptima de rotación de una turbina (su “velocidad”) en una determinada velocidad del viento decrece según el aumento del radio de la misma, con el fin de mantener constante la relación de velocidad pico. Por tanto, sólo pequeñas turbinas (aprox. 2 m radio) pueden ser acopladas directamente a generadores convencionales de cuatro o seis pares de polos. Las máquinas más grandes requieren una caja de cambios para aumentar la frecuencia de accionamiento del generador o generadores especiales multipolares. Cajas de cambios son relativamente caras y pesadas, requieren mantenimiento y pueden ser ruidosas.
- El rotor se puede desacoplar de la carga, con la ventaja de permitir que el rotor sea optimizado para el viento. Algunos desarrollos experimentales con acumulador mecánico (por ejemplo, un

peso levantado por la presión hidráulica), pero sobre todo un método eléctrico es utilizado. Para sistemas autónomos, las baterías químicas proporcionan tanto el desacoplamiento como almacenamiento de energía a largo plazo. Para los sistemas conectados a la red, la energía AC generada puede requerir ser rectificadas a DC y luego invertidas a la frecuencia de red AC, a muy corto plazo, pero útil, una energía almacenada por la “inercia del rotor” se produce, que suaviza las turbulencias del viento. Incluso la provisión de un ‘acoplamiento suave’ usando aspas tambaleantes, amortiguadores u otros mecanismos es útil para reducir los picos eléctricos y tensión mecánica.

- Siempre hay períodos sin viento. Por lo que los aerogeneradores deben estar vinculados a almacenamiento de energía o sistemas paralelos de generación para mantener el suministro de energía de la red.

La *curva de potencia* de la turbina eólica, como en la Figura 2.11, sigue la relación entre el viento de entrada; la velocidad a la cual la turbina eólica empieza a operar, y la capacidad nominal. La turbina eólica usualmente alcanza la capacidad nominal a una velocidad del viento entre 12-16 m/s, dependiendo del diseño de la turbina.

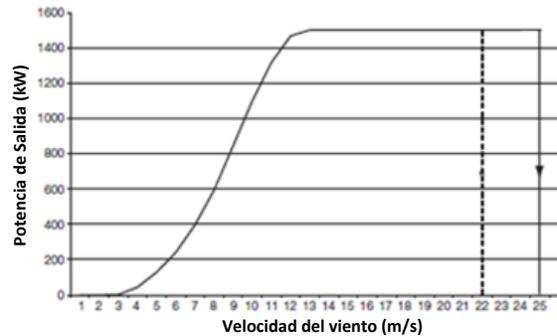


Figura 2. 11 Curva de potencia típica para una turbina eólica de 1.5MW

A velocidades de viento más altas que la velocidad nominal, la producción máxima de potencia será limitada, algunas partes de la energía disponible serán “botadas” debido a la limitante del aerogenerador de no poder aprovechar la energía total del viento por la velocidad que este presenta. La regulación de potencia de salida puede ser alcanzada con el control de paso o con el control de pérdida aerodinámica. Por tanto, una turbina eólica produce potencia máxima dentro de un cierto intervalo de velocidad de viento que tiene su límite superior en la velocidad de viento de desconexión. La velocidad de viento de desconexión es donde la turbina eólica detiene la producción y vuelve a la dirección de viento dominante. Típicamente, esta velocidad de viento de desconexión está en el rango de 20 a 25 m/s.

La curva de potencia también depende de la presión de aire, es decir, la curva de potencia varía en función de la altura sobre el nivel del mar, así como en los cambios en la forma aerodinámica de las palas del rotor, que puede ser causado por la suciedad o hielo. [13]

2.5 PARTES DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

El sistema de energía eólica o WECS se componen de una o más unidades, operando eléctricamente en paralelo, teniendo los siguientes componentes [6] (Figura 2.12):

- Góndola
- Torre.
- Turbina eólica con dos o tres palas.
- Mecanismo de orientación, como la veleta de la cola: Actualmente varios modelos de aerogeneradores cuentan con motores eléctricos de actuación independiente para modificar el ángulo de paso (o de ataque) de las aspas.
- Engranaje mecánico o caja de cambios.
- Generador eléctrico.
- Sensores de velocidad y control.

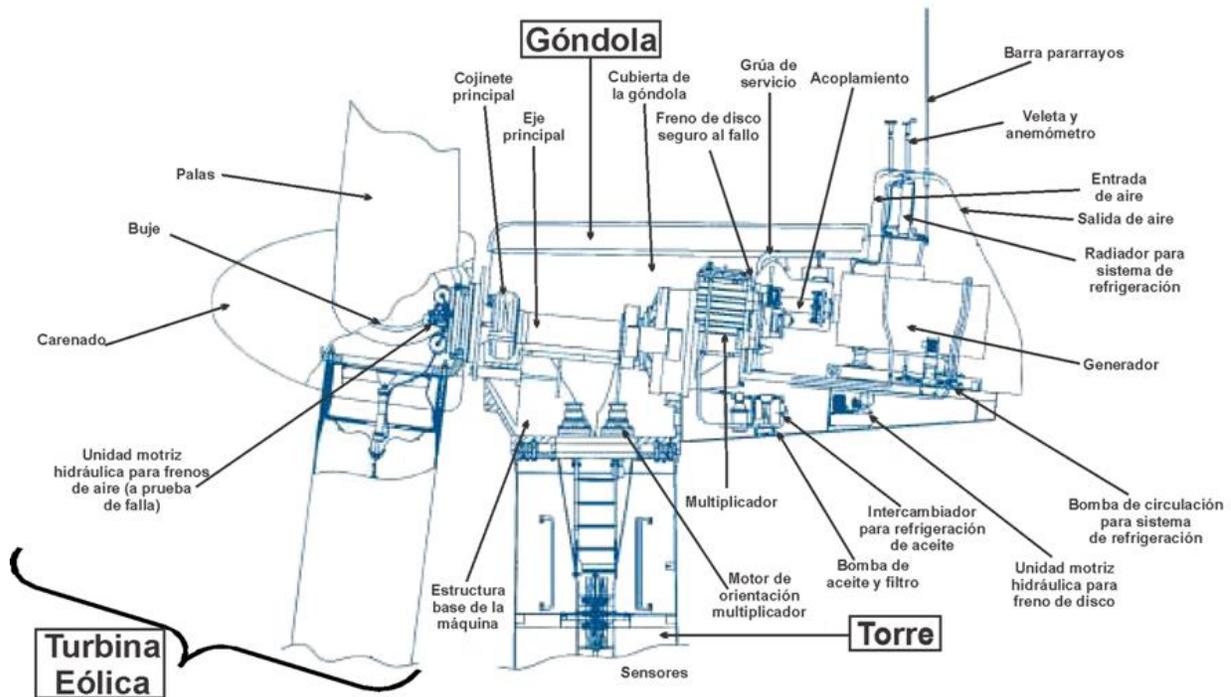


Figura 2. 12 Partes del generador eólico.

Los sistemas modernos a menudo tienen los siguientes componentes adicionales:

- Electrónica de potencia.
- Electrónica de control, por lo general incorporan una computadora.
- Batería para mejorar la disponibilidad de carga en modo autónomo.
- Relación de transmisión que conecta a la red eléctrica.

2.5.1 Góndola

La góndola soporta el alojamiento de los rodamientos del rotor. El movimiento del aire hace que las palas giren y la electricidad es producida por el generador. La góndola contiene los componentes clave del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico. El personal de servicio puede entrar en la góndola desde la torre de la turbina. A la izquierda de la góndola tenemos el rotor del aerogenerador, es decir, las palas y el buje. En esta también se encuentran subsistemas como:

Eje de baja velocidad

El eje de baja velocidad del aerogenerador conecta el buje del rotor al multiplicador. En un aerogenerador moderno de 600 kW el rotor gira bastante lentamente, de unas 19 a 30 revoluciones por minuto (r.p.m.). El eje contiene conductos del sistema hidráulico para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos.

Eje de alta velocidad con freno mecánico

El eje de alta velocidad gira aproximadamente a 1,500 r.p.m., lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico. Está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. El freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina.

El requisito mínimo es que el freno mecánico actúe como freno de estacionamiento, de modo que la máquina se puede detener para fines de mantenimiento. El freno también será utilizado para parar el rotor durante vientos fuertes para la mayoría de los diseños de máquinas, y también en límites de bajas velocidades de viento en algunos casos. El frenado aerodinámico se utiliza inicialmente para desacelerar el rotor, por lo que el par de frenado mecánico puede ser bastante bajo.

Sí el freno mecánico es requerido para detener el rotor en caso de un fallo completo del sistema de frenado aerodinámico, entonces hay dos opciones a considerar. O bien el freno mecánico puede ser accionado cuando un exceso de velocidad que resulta de la incapacidad del sistema aerodinámico se detecta, o accionados simultáneamente con el freno aerodinámico como parte del estándar de emergencia o procedimiento de apagado. La ventaja de la estrategia anterior es que el freno mecánico rara vez, o nunca, tiene que ser desplegado de esta manera, de modo que algunas almohadillas o incluso daño del disco se puede tolerar cuando el despliegue ocurre realmente. Además, la carga de fatiga de la caja de cambios se reducirá si el freno está montado en el eje de alta velocidad (Figura 2.14). Por otro lado, si el freno mecánico se acciona antes de que una sobre-velocidad significativa se haya desarrollado, entonces el par aerodinámico a ser superado por el freno mecánico en el caso de fallo del freno aerodinámico será menor.

El caso más grave de frenado de emergencia aparecerá siguiendo una pérdida de red durante la generación en vientos superiores a los nominales. En el caso de máquinas de paso regulado, el máximo exceso de velocidad se producirá después de pérdida de red a velocidad del viento nominal, debido a la tasa de cambio del par aerodinámico con disminución de velocidad rotacional y pronto se vuelve negativo a velocidades de viento más altas. Por el contrario, si el mecanismo de paso debe atascarse, el trabajo de frenado se vuelve más severo a velocidades de viento en o por encima de la velocidad de viento de salida, ya que pares aerodinámicos mucho mayores son desarrollados a medida que el rotor baja su velocidad y el ángulo de ataque se incrementa. Para máquinas de parada regulada la velocidad del viento crítica esta generalmente a un valor intermedio entre la nominal y de salida [10].

El par de frenado proporcionado por pinzas de agarre en el freno de disco, como se muestra en la Figura 2.13, es simplemente el producto de dos veces la fuerza de la pinza, el coeficiente de fricción (típicamente 0.4), el número de pinzas y el radio de cojín eficaz. Las pinzas proporcionan fuerza de amarre de hasta 500 kN. Sin embargo, el diseño de freno también está limitado por [10]:

- Tensiones centrífugas en el disco,
- Disipación de energía por unidad de superficie del cojín, y
- Aumento de la temperatura de disco.

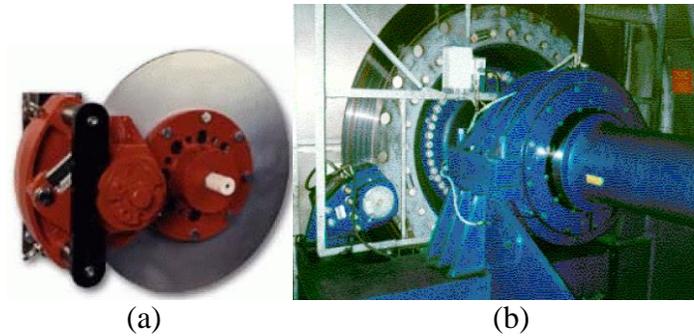


Figura 2. 13 Frenos del disco (a) Flecha de alta velocidad (b) Flecha de baja velocidad.

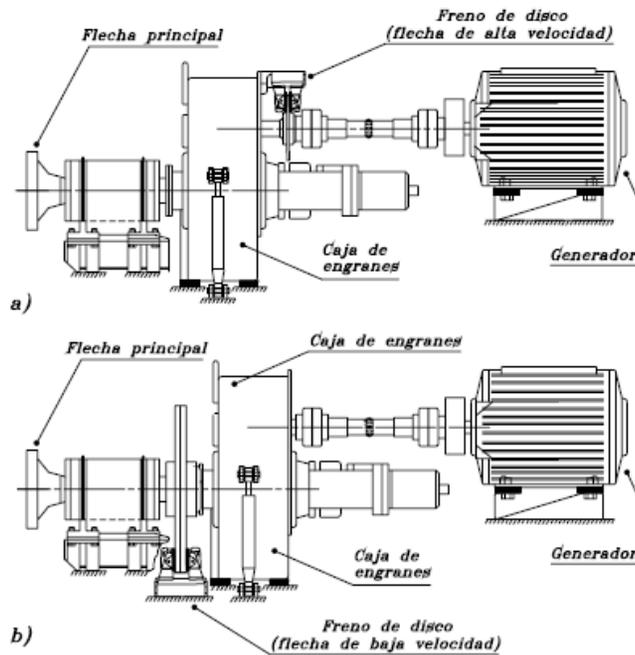


Figura 2. 14 Frenos del disco en las flechas de alta y baja velocidad (a) Flecha de alta velocidad (b) Flecha de baja velocidad.

Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico es utilizado para restaurar los frenos aerodinámicos del aerogenerador.

Unidad de Refrigeración

La unidad de refrigeración contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además contiene una unidad de refrigeración del aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador. Algunas turbinas tienen generadores enfriados por agua.

2.5.2 Torre

La gran mayoría de las torres de las turbinas eólicas están fabricadas de acero. Torres de hormigón son una alternativa perfectamente posible, excepto en los tamaños más pequeños, ya que requieren la transferencia desde la fábrica hasta el emplazamiento de la turbina como se muestra en la Figura 2.15d, que normalmente no ha demostrado ser económico. En consecuencia, esta sección se concentra en los dos tipos de torres de acero – tubulares y de celosía [10].

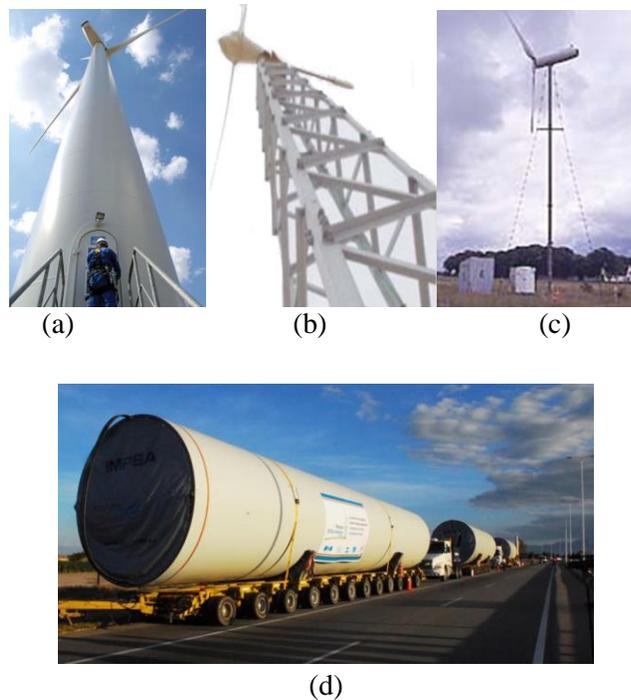


Figura 2. 15 (a) Torre tubular de acero (b) Torre de celosía (c) Torres de mástil tensado con vientos (d) Transporte de torre eólica al sitio de construcción [19].

La mayoría de los grandes aerogeneradores se entregan con torres tubulares de acero, como el de la Figura 2.15a, fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas⁵ en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos *in situ*. Las torres son tronco-cónicas (es decir, con un diámetro creciente hacia la base), con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material.

La Figura 2.15b muestra una torre de celosía las cuales son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados. La ventaja básica de las torres de celosía es su coste, puesto que una torre de celosía requiere sólo la mitad de material que una torre tubular sin sustentación adicional y con la misma rigidez. La principal desventaja de este tipo de torres es su apariencia visual (aunque esa cuestión es claramente debatible). En cualquier caso, por razones estéticas, las torres de celosía han desaparecido prácticamente en los grandes aerogeneradores modernos.

⁵Brida es el elemento que une dos componentes de un sistema de tuberías, permitiendo ser desmontado sin operaciones destructivas, gracias a una circunferencia de agujeros a través de los cuales se montan pernos de unión.

Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores, como se presenta en la Figura 2.15c. La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de coste. Las desventajas son el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre, lo que las hace menos apropiadas para zonas agrícolas. Finalmente, este tipo de torre es más propensa a sufrir actos vandálicos, lo que compromete la seguridad del conjunto [20].

Las palas de turbinas con torres relativamente cortas estarán sometidas a velocidades de viento muy diferentes (y, por lo tanto, a diferente flexión) cuando la pala se encuentre en su posición más elevada y en su posición más baja, lo que provoca un aumento de las cargas de fatiga en la turbina.

Obviamente, se obtendrá más energía de una turbina más grande que de una pequeña, pero sí se echa un vistazo a los tres aerogeneradores de la Figura 2.16, que son de 225 kW, 600 kW y 1,500 kW, respectivamente, y con diámetros de rotor de 27, 43 y 60 metros, se observará que las alturas de las torres también son diferentes [20].

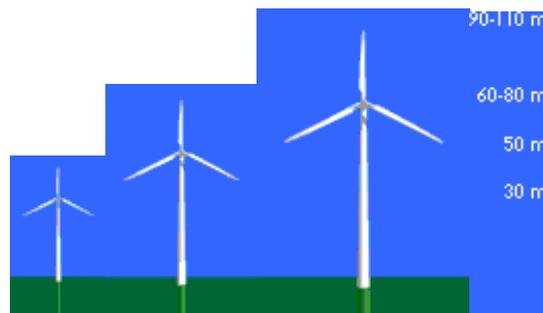


Figura 2. 16 Aerogeneradores de diferentes tamaños.

La elección de un determinado tipo de torre tiene consecuencias sobre la seguridad en el trabajo.

2.5.3 Turbina Eólica

Las palas del rotor son accionadas por el viento y transmiten su potencia hacia el buje. En un aerogenerador moderno de 1,000 kW cada pala mide alrededor de 27 metros de longitud y su diseño es muy parecido al del ala de un avión.

La mayoría de las modernas palas de rotor de grandes aerogeneradores están fabricadas con plástico reforzado con fibra de vidrio (GRP—*Glass Reinforced Plastic*), es decir, poliéster o epoxy reforzado con fibra de vidrio. Utilizar fibra de carbono o aramidas (Kevlar) como material de refuerzo es otra posibilidad, pero normalmente estas palas son costosas para grandes aerogeneradores. Los materiales compuestos de madera, madera-epoxy, o madera-fibra-epoxy aún no han penetrado en el mercado de las palas de rotor, aunque existe un desarrollo continuado en esa área. Las aleaciones de acero y de aluminio tienen problemas de peso y de fatiga del metal, respectivamente. Actualmente sólo son utilizados en aerogeneradores muy pequeños [20].

Los aerogeneradores modernos tienen dos o tres aspas. El firme esfuerzo mecánico debido a las fuerzas centrífugas y fatiga bajo vibraciones continuas hace del diseño de la pala el eslabón mecánico más débil en el sistema [6].

Las palas del rotor de un aerogenerador se parecen mucho a las alas de un avión. De hecho, los diseñadores de palas de rotor usan a menudo perfiles clásicos de alas de avión como sección transversal de la parte más exterior de la pala.

Sin embargo, los perfiles gruesos de la parte más interior de la pala suelen estar específicamente diseñados para turbinas eólicas. La elección de los perfiles de las palas del rotor conllevan una solución de compromiso entre unas características adecuadas de sustentación y pérdida de sustentación, y la habilidad del perfil para funcionar bien incluso si hay algo de suciedad en su superficie, lo cual puede ser un problema en áreas en las que llueve poco [20].

La tensión mecánica en la pala en condiciones de ráfagas de viento es mantenida por debajo del límite permisible. Esto se consigue mediante el control de la velocidad del rotor por debajo del límite establecido. Esto no sólo protege las aspas, sino que también protege al generador eléctrico de sobrecarga y sobrecalentamiento. Un método que ha sido utilizado desde los primeros diseños y se sigue utilizando hoy en día es la regulación por pérdida aerodinámica. El flujo del viento deja de ser suave alrededor del contorno de la pala, pero se separa antes de alcanzar el borde de salida.

Esto sucede siempre en ángulo de paso alto. Las aspas experimentan alta fricción, reduciendo así la potencia de salida del rotor. El ángulo de paso alto también produce elevación. La carga resultante sobre el aspa puede causar un alto nivel de vibración y fatiga, conduciendo posiblemente a un fallo mecánico. Como resultado, el diseño de la cuchilla está cambiando continuamente, particularmente en la raíz de la pala, donde la carga es máxima debido al efecto de voladizo [6].

El diseño aerodinámico de la pala es importante, ya que determina el potencial de captura de energía.

Buje

El buje es el elemento donde se encuentran las palas o aspas del generador, donde se apoya el rotor y el único elemento externo que gira.

En su interior se encuentran los elementos que permiten el cambio de paso (ángulo de incidencia del viento sobre la pala) o *pitch*, en cuyas versiones más modernas se encuentran los cilindros hidráulicos (cilindros de pitch), actuadores eléctricos o hidráulicos que son elementos físicos que permiten el giro entre 0° (cuando la velocidad del viento está entre 0 m/s y 15 m/s) y 90° o posición de bandera (situación en parada de emergencia o cuando no se quiere que el buje gire), por eso, muchas veces cuando un aerogenerador está parado y se mira de frente las palas dibujan una fina línea recta y cuando está en marcha vemos su silueta al completo. A este elemento se le une mediante pernos traccionados los llamados rodamientos de pala, los cuales minimizan el rozamiento de las palas al girar sobre su propio eje.

El buje del rotor está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.

2.5.4 Mecanismo de Orientación

El mecanismo de orientación es activado por el controlador electrónico, que vigila la dirección del viento utilizando la veleta. Normalmente, la turbina sólo se orientará unos pocos grados cada vez, cuando el viento cambia de dirección.

Puede ser tan simple como la veleta de la cola, o más complejo en modernas torres. Las aspas giratorias con grandes momentos de inercia giroscópica producen un par alto durante la orientación, a menudo dando por resultado un ruido fuerte. Orientación muy rápida puede generar ruidos que excedan el límite de ordenanza local. Por lo tanto, una orientación controlada a menudo es requerida e implementada [6].

2.5.5 Caja de Cambios

El multiplicador o caja de cambios tiene a su izquierda el eje de baja velocidad. Permite que el eje de alta velocidad que está a su derecha gire 50 veces más rápidamente que el eje de baja velocidad.

La función de la caja de cambios es incrementar la velocidad de giro del rotor a un valor adecuado para los generadores asíncronos estándar, los cuales, en el caso de máquinas de velocidad fija o máquinas de dos velocidades que operan a velocidad más alta, normalmente de 1,500 rpm más el deslizamiento requerido. Para las máquinas con valores nominales de entre 300 kW y 2,000 kW, con velocidades más altas de giro entre 48 y 17 rpm, manejan tasa de transmisión de entre aproximadamente 1:31 y 1:88, por lo que es necesaria la caja de cambios. Normalmente estos grandes incrementos se consiguen mediante tres etapas separadas [10].

El nivel de esfuerzo de torsión en la caja de cambios de una turbina eólica variará entre cero y el torque nominal de acuerdo a la velocidad del viento.

En el caso de una máquina de paso regulado, el sistema de control de paso no está normalmente diseñado para responder a las fluctuaciones de la velocidad del viento a la frecuencia de paso de pala o superior, ya que esto podría imponer cargas excesivas en el mecanismo de control [10].

La eficiencia de la caja de cambios puede variar en un porcentaje aproximado de 95 a 98 por ciento, dependiendo del número relativo de etapas de eje epicicloidales y paralelo, y el tipo de lubricación.

2.5.6 Generador eléctrico

La Figura 2.17 muestra un generador eléctrico el cual suele ser un generador asíncrono o de inducción. En un aerogenerador moderno la potencia máxima suele estar entre 500 y 4,100 kW.

En principio las únicas diferencias en el funcionamiento entre la máquina de inducción como un generador y como un motor, son la dirección del flujo de energía en los cables de conexión, si se aplica o se toma el par desde el eje y si la velocidad del rotor es ligeramente superior o inferior de sincronismo.

Algunas modificaciones de diseño detallado, por ejemplo, los cambios en material de la barra del rotor, pueden ser hechas por los fabricantes de la máquina para reflejar el régimen de funcionamiento diferente del generador de la turbina eólica, en particular por la necesidad de una alta eficiencia a carga parcial, pero los principios de funcionamiento son los mismos de motores de inducción convencional.

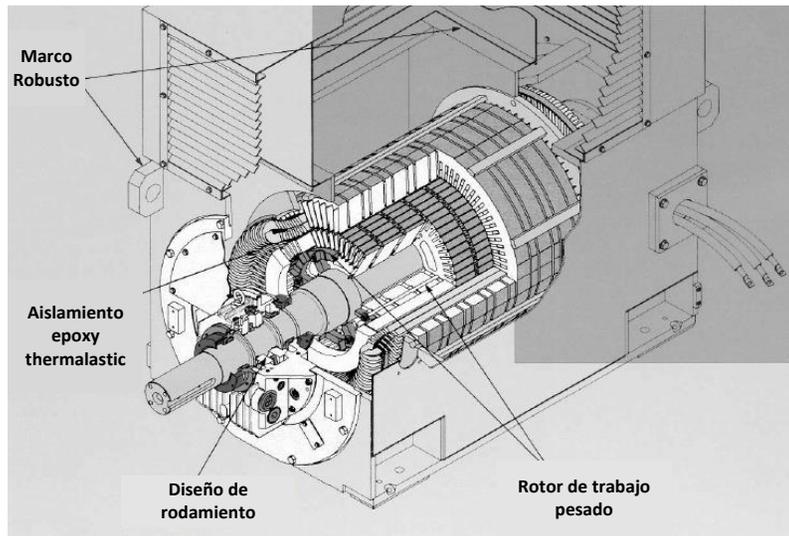


Figura 2. 17 Máquina de inducción de 2 MW. [6]

La velocidad síncrona, que está determinada por el número de polos magnéticos estará en el rango de 1,500 r.p.m (4 polos), 1,000 r.p.m. (6 polos) o 750 r.p.m. (8 polos) para la conexión a una red de 50 Hz. Por razones comerciales, es común el uso de una tensión de sólo 690V incluso para grandes generadores, y en algunas turbinas eólicas muy grandes, las altas corrientes resultantes han dado lugar a la decisión de ubicar el transformador de la turbina en la góndola. La protección física del generador está dispuesta para evitar la entrada de humedad, es decir, un diseño totalmente cerrado, y en algunas turbinas eólicas, líquido de enfriamiento es usado para reducir el ruido aéreo [10].

2.5.7 Sensores de velocidad y control

El controlador electrónico tiene un ordenador que continuamente mide las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier disfunción (por ejemplo, un sobrecalentamiento en el multiplicador o en el generador), automáticamente detiene el aerogenerador y llama al ordenador del operario encargado de la turbina a través de un enlace.

Anemómetro y Veleta

El anemómetro y la veleta se utilizan para medir la velocidad y la dirección del viento. Las señales electrónicas del anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para conectar el aerogenerador cuando el viento alcanza aproximadamente 5 m/s. El ordenador parará el aerogenerador automáticamente si la velocidad del viento excede de 25 m/s, con el fin de proteger a la

turbina y sus alrededores. Las señales de la veleta son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para girar al aerogenerador en contra del viento, utilizando el mecanismo de orientación.

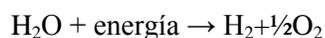
2.6 SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO

El hidrógeno es el elemento más sencillo y más abundante en el universo. En la Tierra, existe en la forma de agua (H₂O). También existe una pequeña cantidad en el aire que respiramos todos los seres vivos. Este puede ser usado como combustible en celdas para generar electricidad a través de un proceso químico que combina dos elementos: oxígeno e hidrógeno. Las celdas de combustible requieren casi el hidrógeno puro (H₂) como el que se consigue en el agua, la biomasa y los combustibles fósiles.

Como en la extracción del petróleo, producir hidrógeno puro requiere de energía. Si los recursos de energía renovable son usados para producir hidrógeno, el impacto en el medio ambiente va a ser mínimo.

En los últimos años se han producido grandes progresos en la utilización del hidrógeno como sistema energético intermedio o vector energético, sirviendo de nexo entre las fuentes primarias de energías y los diferentes sectores de consumo. En ese sentido el hidrógeno complementa a la electricidad y es incluso más útil que ella para cubrir determinadas aplicaciones, y almacenable en grandes cantidades. Presenta, además de estas propiedades, otras que lo hacen idóneo para tal fin. Entre ellas, podemos destacar el ser transportable, no contaminante, fácil de producir, renovable, independiente de recursos primarios, aplicable de diversas formas, y más eficiente que los combustibles fósiles [21].

El hidrógeno es uno de los combustibles alternativos más prometedores para el futuro porque tiene la capacidad de almacenar energía de alta calidad y está acorde con un desarrollo sustentable. El hidrógeno por lo tanto se ha visualizado para convertirse en la piedra angular de los sistemas de energía futuros basados en energía solar y otras fuentes de energía renovables. El concepto de usar el hidrógeno como portador de energía para el almacenamiento y el transporte de la energía, es decir, la supuesta economía del hidrógeno, ha sido estudiado por muchos científicos alrededor de todo el mundo entre ellos Ohta en 1979, Nitsch y Voigt en 1988, Ogden y Williams en 1989, Winter y Nitsch en 1989 y Scott y Häfele en 1990. Estos autores coinciden en que se debe prestar atención a los sistemas basados en la energía del hidrógeno. El hidrógeno se puede producir químicamente a partir de combustibles renovables tales como metano, etanol, o metanol. Una opción muy atractiva es producir el hidrógeno vía electrólisis del agua, debido simplemente a la abundancia de agua en la Tierra. La reacción química básica para separar el hidrógeno y el oxígeno del agua es:



El ciclo básico de producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua con fuentes renovables de energía se muestra en la Figura 2.18.

El hidrógeno puede ser producido a partir de diversas materias primas usando una variedad de procesos tecnológicos. Compuestos que contienen hidrógeno tales como combustibles fósiles, la biomasa o

incluso el agua (como se indicó anteriormente) pueden ser fuente de hidrógeno. Procesos termoquímicos pueden ser usados para producir hidrógeno a partir de la biomasa y de combustibles fósiles como el carbón, gas natural y petróleo. La energía generada de la luz solar, viento y fuentes nucleares pueden ser usadas para producir hidrógeno electrolíticamente. La luz solar por sí sola puede impulsar la producción fotolítica del hidrógeno a partir del agua, usando fotoelectroquímica avanzada y procesos fotobiológicos [22].

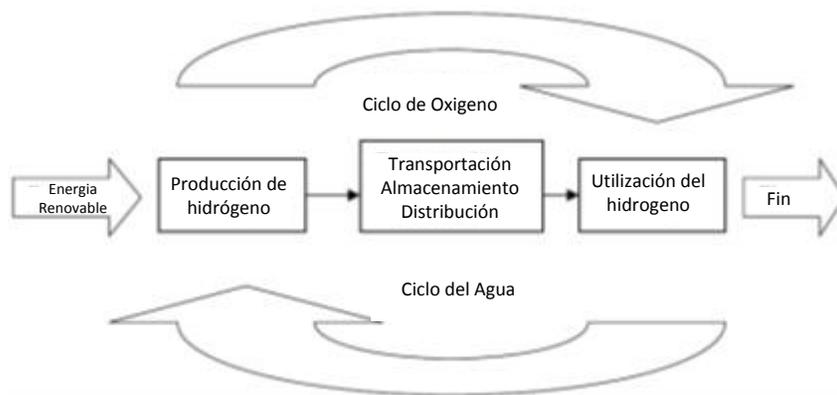


Figura 2. 18 Ciclo básico de producción de hidrógeno por electrólisis de agua

Eventualmente el hidrógeno se unirá a la energía eléctrica como el portador de energía principal, abasteciendo todas las necesidades de consumo final en la economía, incluyendo transporte, energía eléctrica tanto central como distribuida, energía portátil, y producción combinada de calor y energía para procesos industriales. Pero hoy, los vehículos de celda de combustible de hidrógeno (FCV - *Fuel Cell Vehicles*) se encuentran actualmente en la etapa de pre-producción del desarrollo, y la infraestructura para abastecerse de combustible no existe actualmente. El programa de hidrógeno y celdas de combustible del departamento de energía de los Estados Unidos (DOE – *Department of Energy*) está patrocinando una serie de proyectos para demostrar la viabilidad técnica y económica del hidrógeno integrado y los sistemas de celda de combustible en situaciones del mundo real que son consistentes con las estrategias de la transición [22].

2.6.1 Electrolizador

La electrólisis es una tecnología fiable con muchos años de experiencia, numerosos equipos y componentes permiten obtener hidrógeno de gran pureza, y el coste está determinado por la electricidad que se utilice.

El H_2 puede “quemarse” con el oxígeno del aire, desprendiendo calor: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

En una pila o celda de combustible se logra obtener electricidad con dos semireacciones electroquímicas. La electrólisis es el proceso inverso, es decir, la descomposición de agua con electricidad, lo usual es utilizar electrolizadores alcalinos, en plantas industriales, el medio alcalino es preferido, debido a que su corrosión es más fácilmente controlada y económica [23]; se parte de una disolución acuosa como medio alcalino de NaOH o de KOH para que haya una alta conductividad iónica, siendo entonces las reacciones en los electrodos de la siguiente forma:

- Cátodo: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2$
- Ánodo: $2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^-$
- Global: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$

La electrólisis en un sistema real, para generar hidrógeno requiere un voltaje del orden de los 1.7 V, para más eficiencia hay que aplicar un sobre-voltaje (eficiencia de potencia). La generación es medida en Nm^3/h (metro cúbico normal por hora) o kg/s . Hay tres tipos de sobre-voltaje [24]:

- Sobre-voltaje de activación o cinético: es necesario para que la reacción se produzca a una cierta velocidad.
- Sobre-voltaje de concentración: el consumo de OH^- en el ánodo produce el agotamiento de esta especie, por lo que no fluye hacia el electrodo a la velocidad necesaria.
- Sobre-voltaje óhmico: es el correspondiente a todo componente eléctrico, de valor igual a la intensidad que circula por la resistencia eléctrica del sistema.

Existen varios tipos de electrolizadores [23]:

- Electrolizadores PEM (Membrana de intercambio de protones)
- Electrólisis alcalina (nombrada anteriormente)
- Electrólisis de vapor

Los electrolizadores PEM se nombran debido al material electrolítico usado, esto es una membrana de polímero conductora de protones. PEM es el acrónimo de membrana de intercambio de protones, o polímero de membrana electrolítica.

Un PEM consta de una estructura de teflón polímero similar a la de grupos de ácido sulfónico (SO_3H) unidos. Cuando la membrana se humedece el ácido sulfónico se disocia, la membrana se vuelve ácida y por lo tanto conductora de protones. Aunque esto permite un fácil transporte de protones (H^+ -iones⁶), los aniones (iones cargados negativamente) no pueden pasar la membrana [25].

Los electrolizadores PEM usan una membrana polimérica que hace las funciones de electrolito, esta equivale al electrolito ácido (el ion conductor es el H^+ en vez del OH^-). Este electrolizador es ampliamente utilizado en aplicaciones espaciales y en submarinos como el de la Figura 2.19, en la obtención de oxígeno para la respiración.

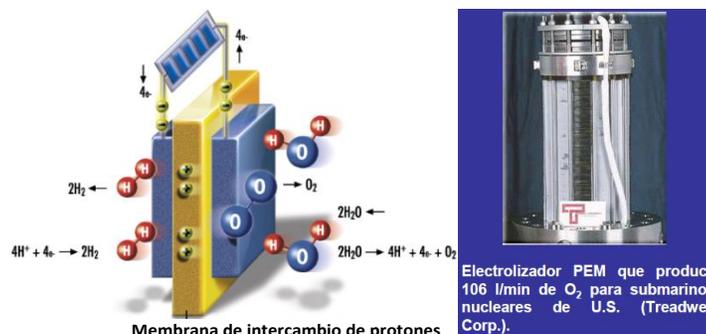


Figura 2. 19 Electrolizador PEM [24, 25]

⁶ H^+ -ion: El hidrogeno pierde un electrón (e^-) y como resultado queda H^+

Los electrolizadores PEM tienen un diseño particularmente sencillo y compacto. El componente central es una membrana de polímero conductor de protones que está recubierto con una capa de material catalizador en cada lado. Estas dos capas son los electrodos de la celda. Cuando un voltaje DC mayor que el voltaje de descomposición de agua se aplica a los electrodos, el electrolizador PEM divide el agua pura en hidrógeno y oxígeno. El voltaje de descomposición teórico del agua es de 1.23 V, sin embargo, a causa de las resistencias de transición, tensiones algo más altas se requieren en la práctica. Electrolizadores de mayor potencia son construidos como pilas de electrolizadores individuales en los que están conectados en serie y los voltajes se suman. Los electrolizadores PEM tienen una eficiencia de hasta ~ 85%.

Suponga que un voltaje DC es aplicado a los electrodos del electrolizador PEM (panel solar en la Figura 2.19). En el ánodo (electrodo de la derecha) el agua se oxida, dejando oxígeno, protones (H^+ iones) y electrones libres. Mientras que el gas de oxígeno se puede recoger directamente en el ánodo, los protones (bloque central+) migran a través de la membrana conductora de protones hacia el cátodo, donde se reducen a hidrógeno (los electrones de éste son proporcionados por el circuito externo).

- Reacción del Cátodo: $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$
- Reacción del Ánodo: $2H_2O \rightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2$

2.6.2 Almacenamiento y distribución

La energía es útil sólo si está disponible donde y cuando se requiera. Llevarla energía donde es requerida se llama distribución o transmisión, mantenerla a disposición hasta que sea requerida se llama almacenamiento. Sin embargo, a medida que aumentan los suministros renovables, existe una necesidad de desarrollar otros métodos de almacenamiento, incluyendo combustibles secundarios, para mantener y mejorar la distribución y la transmisión, especialmente para la electricidad. Suministros de energía renovables tienen diferentes requisitos de almacenamiento y distribución que los suministros de energía fósil y nuclear. Usualmente, la baja intensidad y la localización generalizada de la mayoría de las fuentes renovables favorecen el uso final descentralizado, y la dependencia de la variable de tiempo favorece la integración de varios suministros con almacenamiento en un sistema común. [3]

Almacenamiento de Hidrógeno líquido: El hidrógeno en forma líquida es muy ligero, con una densidad de 77 kg/m^3 , poco más de una décima parte del petróleo/ gasolina (702 kg/m^3), pero su densidad de energía calorífica de 39.4 kWh/kg es tres veces mayor que la de la gasolina (13 kWh/kg).

El hidrógeno gaseoso tiene bajo peso pero muy alto volumen a presión atmosférica. La Figura 2.20 muestra que la densidad de energía del hidrógeno cae drásticamente a medida que pasa de su estado líquido a gaseoso. Para alcanzar la misma densidad de energía en estado gaseoso como en estado líquido, la presión de gas debe ser aumentada de 0.5 MPa (72.5 psi) a 200 MPa ($29,000 \text{ psi}$).

Debido a sus propiedades físicas, los requisitos de almacenamiento como un líquido son radicalmente diferentes de los requisitos de almacenamiento como un gas. Ya sea que se almacene como un líquido o un gas, la contención es también un problema puesto que las moléculas de hidrógeno son muy pequeñas y ligeras, son altamente difusas y tienden a penetrar a través de su envase incluso a bajas presiones. Las fugas también pueden ser un peligro potencial en las estaciones de reabastecimiento de

combustible cuando se vuelven a llenar a presiones muy altas a través de los acoplamientos mecánicos de dispersión.

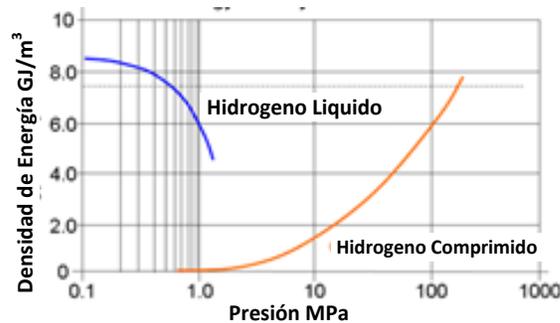


Figura 2. 20 Hidrógeno líquido y gaseoso

El hidrógeno líquido se puede almacenar a baja presión, 0.5 MPa (72.5 psi), pero se debe mantener frío. Son necesarios circuitos de refrigeración y aislamiento para mantenerlo por debajo de su punto de ebullición de 20.3 °K (-252.9 °C) [26].

El almacenamiento en estado gaseoso: Debido a su baja densidad en forma de gas, incluso a muy alta presión, no es un medio de almacenamiento atractivo sobre una base volumétrica. El gas debe ser almacenado a una presión muy alta. Esto necesita cilindros costosos de contención hechos de fibra de carbono o *kevlar* (es una poliamida sintetizada ligera y resistente a la rotura) capaz de resistir muy altas presiones de hasta 70 MPa (~10,000 psi). La fabricación actual de los cilindros de almacenamiento puede almacenar alrededor de 7.5% de hidrógeno en peso y recipientes de altas presiones que almacenan más de 10% en peso están en desarrollo, por ejemplo, si un cilindro de hidrógeno pesa 100 g, el peso del hidrógeno almacenado en el mismo sería de ~ 0.9 g.

Almacenamiento en forma de Hidruros: Hidruros⁷ metálicos y no metálicos ofrecen una solución potencial en el almacenamiento de hidrógeno. En el almacenamiento de hidruro, el hidrógeno se almacena como parte de la matriz de material sólido y es liberada por reacción química o adición de calor. El almacenamiento de hidrógeno de esta manera ofrece el potencial para un almacenamiento seguro, controlable y conveniente. En general, el almacenamiento en hidruro viene en dos variantes: los hidruros metálicos y los hidruros no metálicos. Ambos tienen el potencial para almacenar hidrógeno en aplicaciones móviles de celdas de combustible, pero deben alcanzar una mayor densidad de almacenamiento gravimétrico (la cantidad de proporción del elemento) o menor coste para competir con otras tecnologías [27].

Los hidruros de metal tienen la capacidad de absorber hidrógeno como una esponja y liberar la más tarde, ya sea a temperatura ambiente o por calentamiento. Sistemas prácticos son capaces de absorber hidrógeno de hasta 1% o 2% de su peso o de hasta 5% o más a temperaturas más altas. La extracción de calor produce el proceso de adsorción⁸. Mientras que la adición de calor invierte la reacción química y hace que los átomos de hidrógeno se reformen como moléculas de hidrógeno. El sistema opera a

⁷Hidruros: Son compuestos binarios formados por átomos de hidrógeno y de otro elemento químico, pudiendo ser este metal o no metal.

⁸Adsorción: Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material, en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen.

presiones relativamente bajas de alrededor de 2,4 MPa (350 psi) proporcionando un método seguro de almacenamiento y entrega de hidrógeno a una presión constante. Desafortunadamente se deteriora con el tiempo debido a las impurezas en el gas que contaminan la superficie activa de la aleación [26].

2.7 CELDA DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible convierte la energía química de un combustible en electricidad directamente, sin ciclo de combustión intermedia. Puesto que no hay intermediación de “calor de trabajo” en la conversión, la eficiencia de las celdas de combustible no está limitada por la segunda ley de la termodinámica, a diferencia de los sistemas convencionales que operan por los pasos de funcionamiento de “combustible → calor → trabajo → electricidad”. La eficiencia de conversión de energía química en electricidad por una celda de combustible puede ser teóricamente 100% [3], pero en la realidad depende del tipo de celda, como se puede ver en la tabla 2.4.

Los principales tipos de celda de combustible mostrados en la Tabla 2.4 son descritos en el apéndice B.

Tabla 2. 4 Tipos de Celdas de combustible y características [25]

<i>Celda de Combustible</i>	<i>Electrolito</i>	<i>Temperatura de operación</i>	<i>Eficiencia Eléctrica</i>	<i>Combustible Oxidante</i>
AFC (Alkaline Fuel Cell)	Solución de hidróxido de potasio (KOH)	Temp. Ambiente – 90°C	60-70%	H ₂ , O ₂
PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	Membrana de intercambio de protones	Temp. Ambiente – 80°C	40-60%	H ₂ , O ₂ , Aire
DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	Membrana de intercambio de protones	Temp. Ambiente – 130°C	20-30%	CH ₃ OH, O ₂ , Aire
PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	Ácido fosfórico	160-220°C	55%	Gas natural, bio-gas, H ₂ , O ₂ , Aire
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	mezcla fundida de carbonatos de metales alcalinos	620-660°C	65%	Gas natural, bio-gas, gas de carbón, H ₂ , O ₂ , Aire
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	ion oxido de conducción cerámica	800-1000°C	60-65%	Gas natural, bio-gas, gas de carbón, H ₂ , O ₂ , Aire

Celda de combustible de membrana de polímero electrolítico (PEM), la oficina de eficiencia energética y energías renovables está trabajando en reducir el costo y mejorar la durabilidad de la celda de combustible PEM. Las actividades actuales de investigación y desarrollo (R&D - *Research and Development*) están enfocadas en la mejorar de electrocatalizadores, membranas (tanto para aplicaciones de ambiente y alta temperatura), y materiales de placas bipolares [28].

Las celdas de combustible o también llamadas pilas de combustible o pilas de hidrógeno (*fuel cell*) funcionan entregando energía y potencia por tiempo indeterminado mientras se alimente el sistema con hidrógeno [28].

El funcionamiento de las celdas de combustible es simple. El hidrógeno que pasa por un medio electrolítico (membrana de intercambio de protones en el caso de las Celdas de Combustible tipo PEM), que permite el paso de los protones del hidrógeno, rechazando los electrones que son obligados a pasar por el circuito y carga eléctrica con la consecuente generación de corriente eléctrica.

Las celdas de combustible de Membrana de intercambio de protones (PEMFC - *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) son las más comunes, usan hidrógeno como combustible y oxígeno del aire como oxidante. La reacción básica puede ser ilustrada por la membrana de intercambio de protones, PEM, de celdas de combustible como se muestra en la Figura 2.21

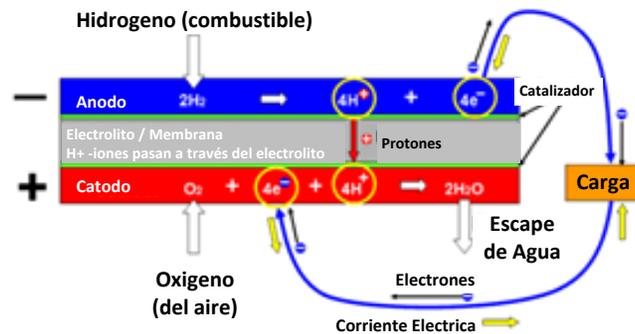


Figura 2. 21 Electroquímica de la celda de combustible [26]

Los elementos que conforman una celda PEMFC son:

Los electrodos: Ánodo y cátodo, están hechos de carbono poroso que permite que los gases activos pasar a través del mismo y la superficie de los electrodos soporta los catalizadores de platino.

El electrolito: Es una hoja delgada de polímero orgánico sólido cuyo espesor es aproximado a 50 micras (0.05 mm) de espesor que permite el paso de iones de hidrógeno, pero es impermeable a los electrones.

Las sustancias químicas activas (hidrógeno): Se suministra al ánodo donde se oxida perdiendo electrones en el proceso. Los iones positivos de hidrógeno (protones) migran a través del electrolito a través de la membrana hacia el ánodo, mientras que al mismo tiempo, los electrones viajan alrededor del circuito externo al cátodo. El oxígeno es suministrado al cátodo, donde es reducido, recogiendo los electrones y los iones del hidrógeno para formar agua.

La energía eléctrica: Los electrones recogidos en el ánodo que fluyen hacia el cátodo representan la corriente convencional eléctrica que fluye en la dirección opuesta. Esta corriente eléctrica está disponible para realizar trabajo en el circuito externo.

Catalizadores: Son necesarios para aumentar la velocidad de oxidación en el ánodo y la tasa de reducción en el cátodo. De esta manera, permiten que la reacción química tome lugar a una temperatura más baja. Alternativamente para evitar el coste de catalizadores costosos, algunas celdas de combustible están diseñadas para trabajar a temperaturas elevadas.

El catalizador de platino usado en PEM's y algunas otras celdas es muy caro y extremadamente sensibles al envenenamiento por muy pequeñas cantidades de monóxido de carbono, por lo que es necesario emplear un proceso de filtrado adicional en el sistema para eliminar los posibles contaminantes.

2.8 SISTEMA HÍBRIDO

Los sistemas híbridos son vistos como una forma de proporcionar energía a las muchas comunidades remotas en el mundo desarrollado donde los costos de expansión a gran escala de las redes eléctricas es prohibitivo y los costos de transporte de combustible diésel también son muy altos [29].

El uso de sistemas de generación renovables reduce el uso de combustibles costosos, permite la generación limpia de energía eléctrica y también mejora el nivel de vida para muchas personas en zonas remotas.

Como se ha mencionado anteriormente, muchas fuentes renovables han madurado tecnológicamente en las últimas décadas. Por lo tanto, su combinación aparentemente brindaría un sistema de alimentación ininterrumpida. Diferentes generadores renovables se complementarían entre sí. Sin embargo, muchos requisitos deben ser considerados primero. Es importante entender todos los factores que influyen en su comportamiento, con el fin de obtener lo mejor. Los factores más importantes son la ubicación, tiempo y necesidades de los usuarios (potencia requerida). La ubicación asocia información sobre el clima, las fuentes de energía disponibles y condiciones ambientales. Esta información es muy importante para decidir qué tipo de generador renovable puede ser elegido. [30, 31]

Debido a los altos niveles de eficiencia de los sistemas híbridos, su fiabilidad y rendimiento a largo plazo, dichos sistemas, pueden ser también implementados como solución de respaldo efectivo para la red pública en caso de apagones o redes débiles, y para soluciones profesionales de energía, tal como estaciones de telecomunicaciones o salas de emergencia de hospitales.

Estos sistemas han probado ser la mejor opción para ofrecer “alta calidad” en los servicios energéticos de la comunidad de áreas rurales al más bajo costo, y con los máximos beneficios sociales y ambientales. En efecto, mediante la elección de energías renovables, países en desarrollo pueden estabilizar sus emisiones de CO₂ mientras aumenta el consumo debido al crecimiento económico [26].

Es de reconocer que muchos de los recursos renovables de generación presentan inconvenientes, como que los paneles solares son muy costosos y el costo de producción por usarlos es generalmente mayor que el proceso convencional, tampoco se puede usar en la noche o días nublados. De forma similar las turbinas de viento no pueden operar en velocidades de viento muy altas o bajas y la planta de biomasa colapsa a bajas temperaturas. Pero para superar estos inconvenientes, si son combinadas en un sistema de generación de potencia híbrido, las falencias pueden ser evitadas parcial o completamente, dependiendo de las unidades de control. Así como uno o muchos inconvenientes pueden ser superados por el otro, como en el hemisferio norte es generalmente visto que en días ventosos la potencia solar es limitada y viceversa, en verano y temporadas de lluvia las plantas de biomasa pueden operar en modo completo, por lo que la generación de potencia pueda ser mantenida. Existen diferentes soluciones para las distintas problemáticas, como el uso de lentes puede disminuir el costo de paneles solares, espejos

de vidrio para calentar un fluido, que pueda girar la turbina usada por el viento y otras fuentes. Luego se presenta la activación del hidrógeno mayormente para noches de invierno o días nublados de invierno con velocidades de viento bajas. El hidrógeno se puede usar para mantener la temperatura del depósito de biomasa en invierno, para la producción de biogás. En día soleado, ventoso y caliente, la turbina funciona a toda velocidad por lo que el suministro es máximo, y este exceso de energía puede ser consumida en la fabricación de hidrógeno [32].

2.9 CONFORMACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICA-HIDRÓGENO CON ALMACENAMIENTO EN CELDA DE COMBUSTIBLE

En el actual trabajo de tesis se presenta un sistema híbrido basado en la energía eólica, la celda de combustible PEMFC y su almacenamiento energético por medio del hidrógeno, siendo que cada uno de los componentes fue anteriormente explicado.

Se seleccionó la celda de combustible PEMFC en la aplicación de este sistema híbrido, debido a sus características de eficiencia eléctrica, temperatura de operación y los combustibles requeridos para su funcionamiento, estas características fueron descritas anteriormente en la Tabla 2.2. Dicha celda de combustible fue creada por la empresa multinacional francesa “Air Liquide”, consume un máximo de hasta 300 Nm³/h de hidrógeno por cada 400 kWh producidos que es su potencia máxima de generación, consta de dos salidas en voltaje directo de 12V y 24V.

El generador eólico implementado es un aerogenerador “Gamesa G80-2.0 MW” de 2 MW, con un diámetro de rotor de 80 m, un área de barrido de 5.027 m², factor de potencia de 0.98 y curva de potencia mostrada en el apéndice C.

También se utiliza un electrolizador de la compañía V-FLO® modelo ZDQ-300 con salida de hidrógeno de 300 Nm³/h con pureza $\geq 99.8\%$ con un consumo eléctrico ≤ 4.5 kWh/m³, así como se muestra en su hoja de datos en el apéndice C.

Para el almacenamiento se tomó en cuenta el HB-SS-16,500, con una capacidad total de 16,500 litros de hidrógeno y un peso menor a 190 kg, como se observa en el apéndice C.

El funcionamiento general del sistema de generación híbrido estudiado, se basa en la generación de energía eléctrica proveniente del viento, siendo que debido a la intermitencia que este presenta, se incluye el manejo de la celda de combustible. Dicha celda empieza a generar potencia eléctrica en los momentos en que la energía eólica no alcanza la demanda requerida, se puede considerar que la implementación de la celda de combustible funciona como respaldo energético para el sistema de generación eólico. Teniendo en cuenta que el combustible primario de la celda PEMFC es el hidrógeno, se requiere de un proceso de producción de hidrógeno, para lo cual se aprovechan los excesos de energía que se generan en el sistema eólico, al mismo tiempo, se debe tener un sistema de almacenamiento de energía sobrante, en otras palabras, el hidrógeno que fue generado pero aún no es requerido por la celda de combustible, para su posterior implementación en el momento en que se requiera y no se pierda dicho exceso de energía. En el siguiente capítulo se mostrará un diagrama de flujos donde se explica el funcionamiento del sistema híbrido en el escenario de energía renovable solamente.

2.10 MODELADO DEL SISTEMA HÍBRIDO

2.10.1 Energía Eólica

Como se estableció en el capítulo anterior, la turbina eólica captura la energía cinética del viento en un rotor que consiste generalmente en tres aspas, acoplado a un generador eléctrico. Varias turbinas eólicas son instaladas en un solo lugar para construir un parque eólico y producir una cierta cantidad de energía eléctrica. La turbina eólica cambia su velocidad de acuerdo a la velocidad del viento y por esto, es necesaria una cantidad mínima de velocidad de viento para arrancar la turbina. Este valor depende de las características de la turbina. La velocidad del viento a la que operan las turbinas es de aproximadamente 12-25 m/s para una potencia nominal, y la velocidad rotacional pico de la turbina está limitada típicamente a 80-100 m/s, así que a medida que las turbinas son más grandes sus velocidades rotacionales se reducen, tal que turbinas de varios MW's rotan lentamente a 15-20 r.p.m [33].

El viento al estar en movimiento posee energía cinética, la cual depende de la masa y la velocidad ($E_c = 0.5mv^2$). La velocidad del viento es medida, pero se debe determinar la masa del aire que atraviesa el aerogenerador. Para ello, se calcula el volumen del aerogenerador y se multiplica por la densidad.

Como las aspas al girar hacen una forma circular, la masa del aire que cruza el aerogenerador tendrá forma de cilindro en un tiempo t , como se muestra en la Figura 2.22, donde se asume en ese instante t en que cruza el viento que la velocidad (V_w) permanece constante.

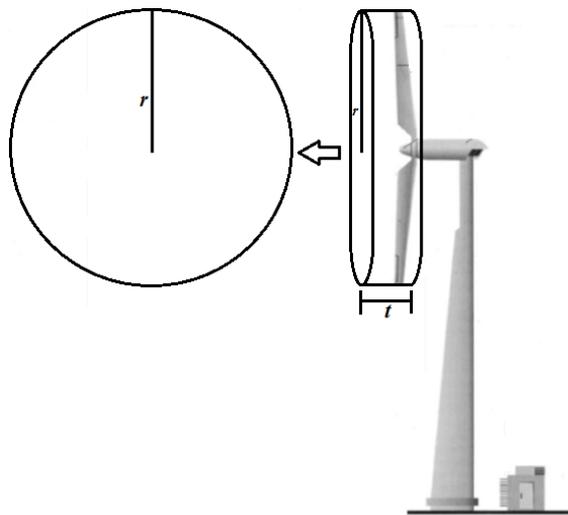


Figura 2. 22 Fragmento de viento que cruza el aerogenerador

La base del cilindro es el área del molino, es decir, πr^2 siendo r el radio de la circunferencia, o sea la longitud de las aspas, luego la altura del cilindro será la distancia recorrida por el aire en el tiempo t , ($V_w \cdot t$).

Como el volumen del cilindro es base por altura, se tiene que $Vol_{cil} = \pi r^2 V_w t$. Por otro lado, la masa del aire que cruza el aerogenerador es igual al volumen por la densidad.

Luego la energía cinética del aire que barre el aerogenerador es:

$$E_c = 0.5mv^2 \quad (2.2)$$

$$E_c = 0.5(Vol_{cil} \cdot \rho)V_w^2 \quad (2.3)$$

$$E_c = 0.5(\pi r^2 V_w t \cdot \rho)V_w^2 \quad (2.4)$$

$$E_c = 0.5\pi r^2 t \rho V_w^3 \quad (2.5)$$

Siendo que la energía cinética depende del cubo de la velocidad del aire. Teniendo en cuenta que la transformación de energía cinética a eléctrica no es perfecta o ideal, se considera un factor de rendimiento, el cual es representado por el coeficiente de potencia C_p , el cual siempre será menor que 1.

Luego, como la potencia es igual a la energía dividida por el tiempo y que el área de circunferencia formada por las aspas al girar es πr^2 , se tiene:

$$E_c = 0.5\pi r^2 t \rho V_w^3 \cdot C_p \quad (2.6)$$

$$E_c = P_e \cdot t = 0.5At\rho V_w^3 C_p \quad (2.7)$$

Cancelando la variable t y quedando como resultado la ecuación (2.8).

Teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, se puede decir de forma resumida que una turbina eólica de sección transversal A , interceptando un frente de aire que viaja a velocidad V_w y densidad ρ producirá potencia, pero la turbina eólica solo puede extraer una fracción de su potencia C_p [33], así la producción de potencia real por turbina puede expresarse como:

$$P_e = \frac{1}{2}\rho A C_p V_w^3 \text{ watts} \quad (2.8)$$

donde:

P_e es la Potencia en watts

ρ es la Densidad del aire (kg/m^3)

A es la Área de barrido de las aspas del rotor (m^2)

V_w es la Velocidad del viento (m/s)

C_p es la Factor de eficiencia denominado coeficiente de potencia

Antes de hacer el cálculo de potencia eléctrica entregada por el generador eólico, es necesario hacer las debidas correcciones y cálculos de cada uno de los parámetros requeridos.

i) Corrección de Velocidad del Viento

Una consideración importante cuando se especifican las salidas de potencia de los aerogeneradores, es el hecho de que la velocidad del viento varía con la altura sobre el suelo. Este efecto se denomina comúnmente como "cizalladura del viento" ("wind shear" en inglés). Por lo tanto, si la velocidad del viento en un sitio se caracteriza en términos de, por ejemplo, la velocidad del viento medida a 10 m sobre el nivel del suelo, algunos medios deben estar disponibles para la conversión a la velocidad del viento a cualquiera que sea la altura del buje de la turbina propuesta. Esto es importante, ya que esta es la velocidad del viento a la altura del eje (es decir, la velocidad del viento vista por el rotor de la turbina eólica) y que determina una potencia más real irradiada por la turbina.

Una forma de hacer el cálculo de la corrección de la velocidad del viento, es la llamada ley de perfil logarítmico del viento, la cual puede ser expresada por la siguiente ecuación [34,35]:

$$V_{cor} = V_w \cdot \frac{\ln\left(\frac{H_1}{z}\right)}{\ln\left(\frac{H_2}{z}\right)} \quad (2.9)$$

donde:

- H_1 es la altura de la velocidad del viento a ser calculada
- H_2 es la altura a la que fueron medidos los datos de velocidad del viento
- V_{cor} es la velocidad del viento a ser calculada
- V_w es la velocidad del viento medida
- z es la longitud de tosquedad o rugosidad del suelo

La longitud de la rugosidad del suelo, z , indica el grado en el que el viento es frenado por fricción a medida que pasa cerca de la tierra: entre más áspero el suelo, más se ralentiza el viento hacia abajo y mayor será la longitud de rugosidad [34]. Para este dato se tiene en cuenta la Tabla 2.5 donde se muestran las clases y longitudes de rugosidad.

ii) Densidad del Aire

$$\rho = \rho_{ref} \cdot e^{\left[\left(-\frac{h}{8435}\right) - \left(\frac{T-15}{288}\right)\right]} \quad (2.10)$$

dónde:

- ρ es la densidad del aire calculada
- ρ_{ref} es la densidad del aire de referencia (comúnmente 1.225 kg/m³)
- h es la altura del sitio sobre el nivel del mar
- T es la temperatura ambiente promedio en centígrados

La densidad del aire se obtiene a partir de la medición de la temperatura y presión del aire usando la ecuación (2.10). A altas temperaturas, se recomienda también medir la humedad relativa y corregirlo [36].

Tabla 2. 5 Clases de rugosidad y Longitud de rugosidad [37]

<i>Clase de Rugosidad</i>	<i>Longitud de Rugosidad</i>	<i>Tipo de paisaje</i>
0	0.0002	Superficie del agua
0.5	0.0024	Terreno completamente abierto con superficie lisa ej. pistas de aterrizaje en aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0.03	Zona de agricultura abierta, sin vallas y setos y edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1.5	0.055	Terreno agrícola con algunas casas y setos de protección de 8 metros de altura a una distancia de aprox. 1250 metros
2	0.1	Terreno agrícola con algunas casas y setos de protección de 8 metros de altura a una distancia de aprox. 500 metros
2.5	0.2	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos de protección de 8 metros de altura a una distancia de aprox. 250 metros.
3	0.4	Aldeas, pueblos pequeños, terrenos agrícolas con muchos o altos setos de protección, bosques y terrenos muy ásperos y desiguales
3.5	0.8	Grandes ciudades con edificios altos
4	1.6	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

iii) Coeficiente de Potencia

Como se dijo anteriormente en la Sección 2.2.4, el coeficiente de potencia indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad. Simplemente dividiendo la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada, para medir que tan técnicamente eficiente es un aerogenerador.

Se toma la curva de potencia del aerogenerador, como la mostrada en la Figura 2.23 y se divide por el área de barrido del rotor para obtener la potencia disponible por metro cuadrado de área del rotor, como se muestra en la ecuación (2.11).

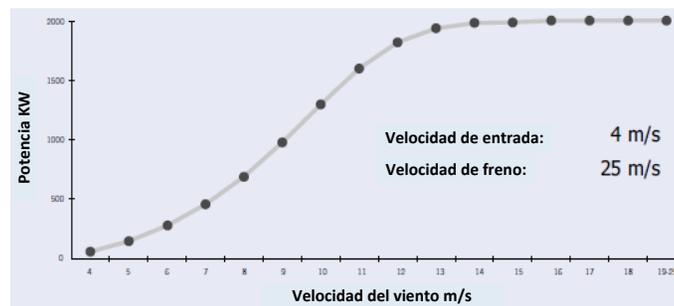


Figura 2. 23 Curva de potencia de Aerogenerador observada en el Apéndice C.

$$P_{dis} = \frac{P_{VelTurb}}{A} \quad (2.11)$$

dónde:

P_{dis} es la potencia disponible por metro cuadrado de área del rotor

$P_{VelTurb}$ es la potencia según cierta velocidad del viento (características del aerogenerador)

A es el área de barrido del rotor (características del aerogenerador)

Posteriormente, para cada velocidad del viento, se divide el resultado por la cantidad de potencia en el viento por metro cuadrado, como en la ecuación (2.12) [38].

$$C_p/\lambda_{curve} = \frac{P_{dis}}{P_{nom}} \quad (2.12)$$

dónde:

C_p/λ_{curve} es la curva de coeficiente de potencia C_p con respecto a la velocidad periférica λ
 P_{nom} es la potencia eólica entregada según valores nominales en un área de un metro cuadrado

Para el cálculo de P_{nom} , se tiene en cuenta la aplicación de la ecuación (2.8) con valores nominales, esto es, $C_p=1$, $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ y $A=1 \text{ m}^2$ para las diferentes velocidades del viento.

La potencia entregada por la turbina es gobernada por varios parámetros de diseño, uno de gran importancia, es el factor de eficiencia de la turbina (C_p), en práctica es menos que el teórico 0.599 y también varía respecto a la relación de velocidad periférica λ , como se muestra en la Figura 2.24 [33].

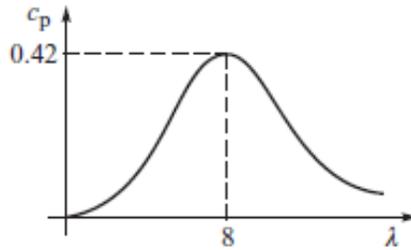


Figura 2. 24 Curva típica C_p/λ para una turbina eólica

iv) Potencia Reactiva

Todas las ecuaciones obtenidas anteriormente describen el modelo del generador eólico para la generación de potencia activa en el presente trabajo, teniendo en cuenta los parámetros de la turbina que se utilizó para la aplicación del modelo y también los datos de viento recopilados. Para tomar en cuenta la potencia reactiva de la turbina en el modelo, se tomó como dato fundamental el factor de potencia de la turbina eólica que se implementó para llevar a cabo este modelo. Teniendo en cuenta la existencia de un modelo de estado estable de una máquina de inducción y aplicando el teorema de Boucherot [39], dicha expresión también puede emplearse en el cálculo de potencia reactiva a consumir por la turbina eólica [40].

$$Q = \frac{V^2(X_c - X_m)}{X_c X_m} + \frac{X(V^2 - 2RP)}{2(R^2 + X^2)} + \frac{X^2 \sqrt{(V^2 - 2RP)^2 - 4P^2(R^2 + X^2)}}{2(R^2 + X^2)} \quad (2.13)$$

dónde:

V es el voltaje

X_c es la reactancia del banco de capacitores

X_m es la reactancia de magnetización
 X es la suma de las reactancias del estator y rotor
 R es la suma de las resistencias del estator y el rotor
 P es la potencia activa

Considerando que ambas potencias, activa y reactiva, fluctuaran en función de la velocidad del viento, se puede decir que el generador de inducción requiere proporcionalmente más potencia reactiva cuando entrega más potencia activa, la dificultad en el manejo de la ecuación (2.13) no está en la aplicación de la misma, sino en tener los parámetros que son requeridos de dicha turbina específicamente. Por lo tanto, en el presente trabajo se utilizará el método de factor de potencia para calcular la potencia reactiva, para lo cual también se tiene en cuenta el triángulo de potencia mostrado en la Figura 2.25.

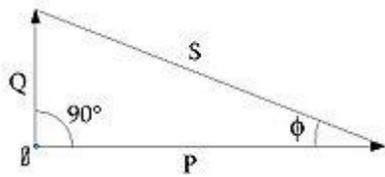


Figura 2. 25 Triángulo de potencias activa (P), reactiva (Q) y aparente (S)

Inicialmente se tiene un factor de potencia de valor $\cos \phi$, obtenido de las características del aerogenerador, del cual se puede obtener el valor de ángulo ϕ y luego aplicando tangente al triángulo de potencias ($\tan \phi = Q/P$) y despejando Q se obtiene la potencia reactiva.

2.10.2 Electrolizador

La operación básica de la celda de combustible de hidrógeno es simple, tal que puede ser demostrada usando un pequeño experimento, el cual se muestra en la Figura 2.26, en la Figura 2.26(a), el agua está siendo electrolizada en hidrógeno y oxígeno, pasando una corriente eléctrica a través de ella. En la Figura 2.26 (b), la fuente de potencia ha sido reemplazada por un amperímetro, y una pequeña corriente está fluyendo por dicho dispositivo.

La producción de hidrógeno es simple, y teniendo dicho combustible, se procede a recombinar el hidrógeno y oxígeno, y una corriente eléctrica es producida. Siendo químicamente representado por:



Como se observa en la Figura 2.26(a), la electrólisis es parte fundamental para la producción de hidrógeno puro, por lo que se debe tener en cuenta para el modelo de sistema híbrido. Para ello se tiene en cuenta las leyes de Faraday de Electrólisis, aunque se pueden encontrar varias versiones de dichas leyes, las más comunes son las siguientes:

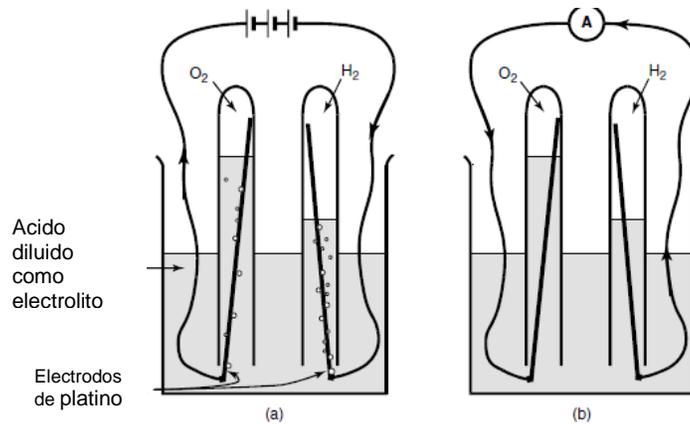


Figura 2. 26 Experimento de electrólisis del agua. (Nota. Las flechas representan el flujo de electrones negativos de - a +)

Primera ley de Faraday de Electrólisis: La masa de la sustancia alterada en el electrodo, durante la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transferida en ese electrodo. La cantidad de electricidad hace referencia a la cantidad de carga eléctrica, típicamente medida en coulomb [41].

Segunda ley de Faraday de Electrólisis: Para una cantidad dada de electricidad DC (carga eléctrica), la masa del elemento material alterado en un electrodo es directamente proporcional al peso equivalente de los elementos. El peso equivalente de una sustancia es la masa molar dividida por un entero que depende de la reacción sufrida por el material [41].

La primera ley puede ser expresada en una forma matemática como sigue:

$$V_g = \left(\frac{RITt}{Fpz} \right) \quad (2.15)$$

dónde:

V_g es el volumen del gas (litros)

R es la constante ideal de gases = 0.0820577 (L*atm/mol*K)

I es la corriente (Amperes)

T es la temperatura (°K)

t es el tiempo (segundos)

F es la constante de Faraday = 96485.31 (C/mol)

p es la presión ambiente (atm)

z es el número de exceso de electrones (2 para H_2 y 4 para O_2)

De la ecuación (2.15) se puede obtener la cantidad de hidrógeno generado, aplicando una corriente de DC en cierta cantidad de tiempo, datos importantes para el manejo de la celda de combustible.

Es importante notar que la producción de hidrógeno a través de la electrólisis en el agua es un método de almacenamiento de la energía eólica.

Este hidrógeno es subsecuentemente usado para generar electricidad durante periodos en que la demanda no puede ser alcanzada con el viento solamente. La energía almacenada de hidrógeno puede ser convertida en potencia eléctrica por medio de la tecnología de la celda de combustible (FC).

Como se explica anteriormente, el hidrógeno puede ser conseguido por medio de la electrólisis del agua, usando cualquier fuente de electricidad. El gas puede ser almacenado, distribuido y quemado para liberar calor. El único producto de combustión es el agua, así que al final de su uso no se genera ningún tipo de polución [3]. El uso de la electrólisis, tiene las ventajas de que este proceso es estático y simple, puede funcionar por largos periodos de tiempo sin atención y generar hidrógeno muy puro para el uso en la celda de combustible.

En cuanto a la celda de combustible, se entiende que es básicamente el proceso inverso de la electrólisis del agua, ya que en esta tecnología se recombina el hidrógeno con el oxígeno para la generación de potencia eléctrica y agua.

2.10.3 Celda de Combustible

La celda de combustible de membrana de polímero electrolítico (*PEMFC-Proton Exchange membrane fuel cell*), como la mostrada en la Figura 2.27, es el tipo de celda que se utilizó para desarrollar el modelo en el presente trabajo, dicha FC es capaz de generar eficientemente gran cantidad de potencia, esta se diferencia de otras tecnologías de FC, en que una fase solida de membrana de polímero es usada como el separador de celda/electrolito. El separador de celda es una cinta de polímero y la celda opera a una temperatura relativamente baja, permitiendo un arranque potencialmente rápido, temas como sellado, ensamblaje, y manejo, son menos complejos que en los demás tipos de celda. La necesidad de manejo de ácidos corrosivos o bases se elimina en este sistema [23].

La celda presenta perdidas internas en potencial eléctrico, tales como las pérdidas de activación, perdidas óhmicas y perdidas por transporte de masa [42].

- **Pérdidas de activación:** Estas se derivan de la energía de activación de las reacciones electroquímicas en los electrodos. Estas pérdidas dependen de las reacciones que se llevan a cabo electroquímicamente al interior de la celda de combustible, el material electro-catalizador y la micro-estructura, las actividades reactivas (y por lo tanto la utilización), y débilmente en la densidad de corriente [23].
- **Pérdidas Óhmicas:** Las pérdidas óhmicas son causadas por la resistencia iónica en el electrolito y los electrodos, la resistencia electrónica en los electrodos, colectores de corriente y las interconexiones, y resistencias de contacto. Las pérdidas óhmicas son proporcionales a la densidad de corriente, depende de la selección de materiales y la geometría de la pila, y temperatura.
- **Pérdidas por transporte de masa:** Estas son un resultado de las limitaciones de transporte de masas finitas de los reactivos y dependen fuertemente de la densidad de corriente, la actividad del reactivo, y la estructura del electrodo [23].

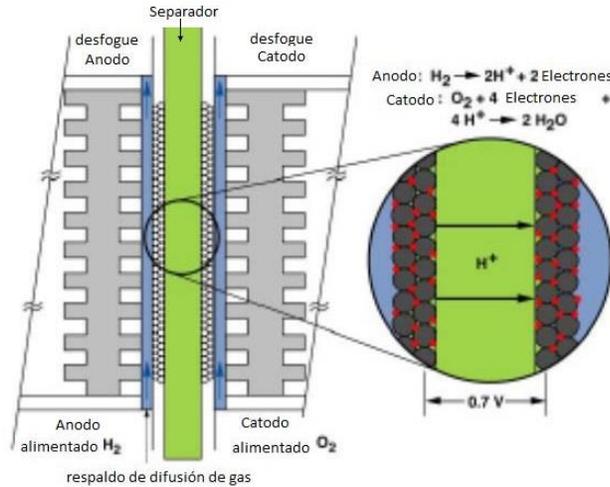


Figura 2. 27 Esquema representativo de PEMFC [23]

Las pérdidas internas en la celda de combustible son despreciadas en este modelo, debido a que su valor tiende a ser muy insignificante y por lo tanto no modifican en proporción notable el resultado. Como fue comprobado por Kunusch C., Puleston P., y Mayosky M. [43].

Teniendo en cuenta las pérdidas de voltaje dentro de la celda de combustible, se construye la siguiente ecuación:

$$V_c = E - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{trans} \quad (2.16)$$

dónde:

E es el voltaje de circuito abierto reversible

Siendo los tres últimos términos de la ecuación (2.16), las pérdidas de voltaje antes mencionadas respectivamente y debido a que son despreciadas, su valor se toma como cero. El voltaje de celda se asume en 0.65V [44], ya que si el valor de voltaje de celda no es dado por el proveedor se puede asumir un valor entre 0.6V – 0.7V y usar 0.65V es una buena aproximación.

Teniendo en cuenta la ley de Faraday de electrólisis (ecuación (2.15)) y algunas ecuaciones de la celda de combustible, se puede calcular el hidrógeno usado para generar cierta cantidad de potencia, la potencia eléctrica generada:

$$P_e = V_c \times I \times n \quad (2.17)$$

dónde:

I es la corriente de celda

n es la cantidad de celdas de combustible en el stack

V_c es el voltaje de celda

Tomando en cuenta las ecuaciones (2.15) y (2.17) se puede deducir:

$$V_{H_2} = \left(\frac{P_e RTt}{2FpV_c} \right) \quad (2.18)$$

dónde:

P_e es la potencia eléctrica

V_{H_2} es el volumen de hidrógeno requerido

Al observar la ecuación (2.18) se deduce el volumen de hidrógeno producido por el electrolizador con dicha potencia de entrada.

La cantidad de hidrógeno requerido por la celda de combustible, requiere saber la cantidad de celdas de combustibles que conforman el stack de la FC final.

$$H_{2usado} = \frac{P_e}{2 \times V_c \times F} \text{ moles/s} \quad (2.19)$$

En la ecuación (2.19) [44] solo se calcula el hidrógeno requerido por cada celda de combustible y no la requerida por todo el stack [42, 45]. Como la masa molar del hidrógeno es 2.02×10^{-3} kg/mol, y teniendo en cuenta el valor de la constante de Faraday (F), se deduce:

$$H_{2usado} = 1.05 \times 10^{-8} \frac{P_e}{V_c} \text{ Kg /s} \quad (2.20)$$

2.11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rahman, S. (2007). *Renewable energy*. Pakistan. University of Engineering & Technology, Lahor. (pp. 44-53, 54)
- [2] Da Rosa A. (2009). *Fundamentals of renewable energy processes*. USA, Academic Press. Second Edition. (pp. 11-28). ISBN 9780123746399.
- [3] John, T. y Tony, W. (2005). *Renewable energy resources*. USA, Taylor & Francis. Second Edition. (pp. 2-10,106,183, 236-238, 290-291, 305, 307-310, 489-495, 506). ISBN 0419253203
- [4] Stiebler M. (2008). *Wind energy systems for electric power generation*. Germany, Berlin. Springer. (pp. 17-18). ISBN 9783540687627
- [5] Ortega M. (2006). *Energías Renovables*. España, Thomson y Spain Paraninfo. Segunda edición. (pp. 328). ISBN 9788428325820
- [6] Patel M. R. (1999). *Wind and solar power systems*. USA, Florida. CRC Press. (pp. 20,24-28, 52-53, 86-98, 107-114, 138-140). ISBN 0849316057
- [7] Telosnet. (2001, 11, 6). *Illustrates history of wind power development*. Telos Net&Darrell Dodge. Recuperado de <http://www.telosnet.com/wind/early.html>

- [8] Grottolo, M. (2009). *Siemens Wind Power: Tecnología de punta en aerogeneradores*, © Siemens AG. (pp. 15-20)
- [9] Treacy M. (2011, 2, 9). *Wind energy now cost competitive with coal*. Ecogeek. Recuperado de Página de internet: <http://www.ecologiahoy.com/ahora-la-energia-eolica-tiene-un-precio-similar-al-carbon>
- [10] Burton T., Sharpe D., Jenkins N. y Bossanyi E. (2001). *Wind energy handbook*. USA, John Wiley and Sons. (pp. 11, 12-14, 424-439, 443-444, 453-454). ISBN 0471489972
- [11] Global Wind Energy Council. (2012 y 2013 respectivamente). *GWEC*. Lauha Fried, Shruti Shukla & Steve Sawyer. Reporte de actualización anual 2011 (pp. 48) y 2012 (pp. 2).
- [12] Asociación Mexicana de Energía Eólica A.C. (2013, 03, 27). *Amdee*. Recuperado de <http://www.amdee.org>
- [13] Ackerman, T. (2005). *Wind power in power systems*. USA, John Wiley and Sons, Second Edition. (pp. 34-35, 78). ISBN 0470855088
- [14] Textos Científicos. (2006, 5, 18) *Centrales eólicas*. TextosCientificos.com. Recuperado de <http://www.textoscientificos.com/energia/centrales-electricas/eolicas>
- [15] TheWindPower. (2012, 10, 12). *México*. Wind turbines and wind farms database. Recuperado de http://www.thewindpower.net/country_en_36_mexico.php
- [16] Danish Wind Industry Association. (2003, 5, 7). *Descripción de las variaciones del viento: distribución de Weibull*. Asociación Danesa de la industria eólica windpower.org. Recuperado de http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/weibull.htm.
- [17] Wind Power. (2000, 3, 7). *La rosa de los vientos*. Asociación danesa de la industria eólica. Recuperado de <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dge/publicaciones/uso/1/01/02/08/es/tour/wres/rose.htm>.
- [18] Bañuelos F. (2011). *Impacto de la generación eléctrica usando Fuentes de energía eólica en la red eléctrica nacional*. (Tesis doctoral). Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. (pp. 52)
- [19] Oeste Zonadura. (2012, 5, 19). *Supervisan la llegada de nuevas torres para el parque eólico*. Blog informativo. Recuperado de <http://oestezonadura.blogspot.mx/2012/05/supervisan-lallegada-de-nuevas-torres.html>
- [20] Wind Power. (2000, 3, 7). *Curva de potencia de un aerogenerador* Asociación danesa de la industria eólica. Recuperado de <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dge/publicaciones/uso/1/01/02/08/es/tour/wres/pwr.htm>

- [21] Contreras A. and Posso F. (2005). *Modeling and simulation of the production of hydrogen from hydroelectricity in Venezuela*. Elsevier. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 32, Issue 9. (pp. 1219-1224). ISSN 0360-3199.
- [22] Hydrogen and Fuel Cells Program. (2013 2, 12). *Hydrogen production*. U.S. Department of energy. Recuperado de <http://www.hydrogen.energy.gov/production.html>
- [23] EG&G Technical Services, Inc. (2004). *Fuel Cell Handbook*. US Department of Energy. Seventh Edition. (pp. 63, 88-90, 413-415)
- [24] Tejera, E., Villafuerte, O. (2007, 5, 10). *Producción de hidrógeno*. España-Portugal. Recuperado de <http://epastor.webs.ull.es/Tema%202%20Parte%20a.pdf>. (pp. 6-25)
- [25] H-Tec education. (2003, 03, 27) *Solar-Hydrogen Energy System*. Luebeck-Germany. Recuperado de <http://www.h-tec.com/fileadmin/content/edu/Lehrmaterialien/Transparencies.pdf> (pp. 6,21,23-24)
- [26] Woodbank Communications. (2005, 3, 7). *Hydrogen fuelled electricity generation*. United Kingdom. Recuperado de http://www.mpoweruk.com/hydrogen_fuel.htm
- [27] Mench, M. (2008). *Fuel cells engines*. USA. New Jersey. John Wiley and Sons. (pp.426). ISBN 9780471689584
- [28] EERE. (2013, 2, 12). *Hydrogen & fuel cells*. U.S. Department of energy: Energy Efficiency & Renewable Energy. Recuperado de http://www.eere.energy.gov/topics/hydrogen_fuel_cells.html
- [29] Baring I., (2013, 3, 16). *Hybrid power systems*. CEERE Center for Energy Efficiency & Renewable Energy. Recuperado de http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2/hybrid_power_systems.html
- [30] Ribeiro E., Marques A., and Boccaletti C. (2009). *Uninterruptible Energy Production in Standalone Power Systems for Telecommunications*. European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPO). International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ). Vol 1. (pp. 1-6)
- [31] Gagari D., Ramananda P. y Sudip D. (2012). *Hybrid power generation system*. International Journal of Computer and Electrical Engineering (IJCTE), Vol. 4, Issue 2. (pp. 141-144)
- [32] Woodbank Communications. (2005 7 5). *Hybrid power generation systems*. United Kingdom. Electropedia. Recuperado de http://www.mpoweruk.com/hybrid_power.htm
- [33] Machowski J., Bialek J. and Bumby J. (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control*. UK. John Wiley & Sons Ltd. Second Edition. (pp. 265-267). ISBN 9780470725580
- [34] TNEI Services Ltd. (2010). *Appendix 8.6: Wind Speed Calculations*. HMP Standford Hill Wind

Energy Development. (pp. 2-4)

- [35] Ángeles-Camacho C., Bañuelos F., Serrano-García J. y Muciño-Morales D. (2008). *Análisis de metodología usada para la obtención de perfiles de velocidad de viento*. IEEE. RPV-AI/2008 sección México. Ingeniería Investigación y Tecnología.
- [36] International Standard. (1998). *IEC 61400-12*. International Electrotechnical Commission. First Edition. (pp. 14)
- [37] Danish Wind Industry Association. (2012, 10, 21). *Wind energy concepts*. WindPower. Recuperado de http://wiki.windpower.org/index.php/Wind_energy_concepts
- [38] Wind Power. (2000, 3, 15). *Coefficiente de potencia*. Asociación danesa de la industria eólica. Recuperado de <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dge/publicaciones/uso/1/01/02/08/es/tour/wres/cp.htm>
- [39] Feijoo A. E., Cidras J. (2000). *Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis*. IEEE. Energy Conversion, IEEE Transactions. Vol. 15 Issue 1. (pp. 110-115). ISSN 08858950
- [40] Ángeles-Camacho C. y Bañuelos F. (2011). *Incorporación de un modelo de generador eólico al análisis de flujos dinámicos de potencia*. Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. 12, Núm. 3, (pp. 311-320). ISSN 1405-7743 FI-UNAM
- [41] Gene R. and Ihde A. (1954). *Faraday's Electrochemical Laws and the Determination of Equivalent Weights*. Journal of Chemical Education. Vol. 31, Issue 4. (pp. 226–232).
- [42] Kunusch C., Puleston P., and Mayosky M. (2012). *Sliding-Mode Control of PEM Fuel Cells*. UK. Springer-Verlag London Limited. ISBN 9781447124313 (pp. 5)
- [43] Kunusch C., Puleston P., and Mayosky M. (2010). *Characterization and experimental results in PEM fuel cell electrical behavior*. Elsevier. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 35, Issue 11. (pp. 5876–5881). ISSN 03603199
- [44] Larminie J., Dicks A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained*. UK. John Wiley & Sons Ltd. Second Edition. (pp. 1-5, 396-399). ISBN 047084857X
- [45] Sammes N. (2006). *Fuel Cell Technology*. UK. Springer-Verlag London Limited. (pp. 35-37). ISBN 1852339748

APLICACIÓN EN CASO DE ESTUDIO

3.1 CASO DE ESTUDIO

Cuando se tiene un generador eólico se puede observar que la potencia activa producida es proporcional al cubo de la velocidad del viento, y cambios relativamente pequeños donde esta puede desaparecer o estar por debajo de la velocidad nominal pueden causar grandes cambios en la potencia producida e inyectada a la red, por lo tanto, cuando la potencia del viento no puede producir de acuerdo a lo pronosticado, otros productores eléctricos tienen que incrementar o reducir sus generación de potencia con el fin de asegurar que la demanda y suministro de potencias sean iguales (balance energético). Existen muchos métodos para balancear el suministro de potencia proveniente del viento, una posibilidad es el uso del almacenamiento de energía como baterías, almacenamiento de agua o hidrógeno.

En el presente trabajo se propone un sistema híbrido eólico-electrolizador-FC con los elementos y características nombradas en la Sección 2.9 del capítulo anterior. El sistema usa la turbina eólica como principal fuente de energía, un electrolizador para absorber el exceso de potencia de la fuente eólica y producir hidrógeno, un tanque de hidrógeno con el fin de almacenar el hidrógeno generado a partir de la electrólisis y una celda de combustible para suplir el déficit de potencia quemando el hidrógeno, cuando la potencia del viento no alcance la demanda requerida.

La potencia generada por el sistema híbrido, que llega a un máximo de 2.4 MW en condiciones óptimas, no tiene complicaciones para ser integrado a la red eléctrica como generación concentrada, esta unidad de generación debe ser usada como un instrumento para alcanzar a una cierta estabilidad del sistema y/o para mejorar la calidad de la energía. La conexión eléctrica de una FC como generación concentrada a la red puede ser hecha a través de un convertor de DC a AC debido a que la salida de voltaje que maneja la FC es de corriente directa (*Direct Current - DC*).

Observando la evolución de nuevas tecnologías en el campo eléctrico y considerando las diferentes posibilidades de conexión con el sistema híbrido presentado, existen muchas ventajas en la aplicación del mismo, gracias a las características de salida, permite la conexión con redes inteligentes o diferentes tecnologías, con lo cual la potencia de salida del sistema es totalmente adaptable a la necesidad y tipo de conexión de la red.

La Figura 3.1, muestra el posible escenario para satisfacer la demanda de energía usando el sistema híbrido aquí propuesto donde, si la potencia eólica no puede alcanzar la demanda requerida, la celda de combustible trabaja como respaldo, y los excedentes de energía eólica son usados para generar hidrógeno.

La Figura 3.2 muestra el diagrama de conexión de los elementos que forman el sistema híbrido – celda de combustible con almacenamiento de hidrógeno, donde el bloque “toma de decisión” representa el diagrama de bloques mostrado en la Figura 3.1, donde se explica el funcionamiento interno del sistema híbrido y cómo van a interactuar cada uno de los elementos del sistema híbrido.

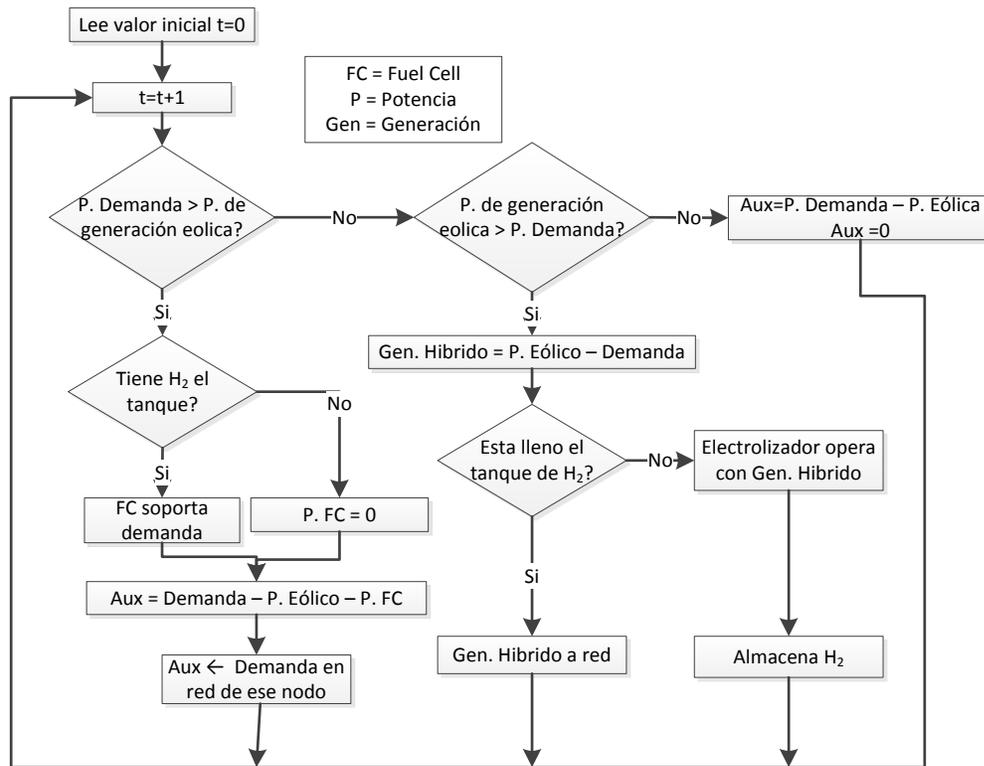


Figura 3. 1 Diagrama de flujos potencia en el escenario de energía renovable solamente.

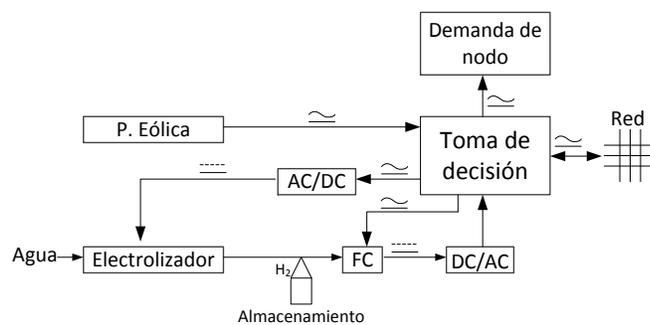


Figura 3. 2 Diagrama de conexión del sistema híbrido

Para el caso inicial se utiliza una demanda de nodo variable con respecto al tiempo cuyos datos fueron tomados de una línea del enlace Querétaro potencia - Querétaro maniobras, aunque los datos de demanda y los datos de viento, que pertenecen a Campeche, no pertenecen a un mismo lugar, para el caso de estudio es válido ya que sirve para observar una mejor relación con una red real, permitiendo relacionar la variación energética de demanda con respecto a la variación de producción de potencia

eléctrica por parte del sistema híbrido en diferentes días, esta demanda varía de 1.6 MW a 2.8 MW y la potencia generada por el sistema híbrido oscila entre 0 MW a 2.4 MW.

Para esta configuración de conexión entre los elementos que conforman el sistema híbrido, la potencia eólica residual después de haber abastecido la demanda del nodo es usada para activar el electrolizador y generar hidrógeno, en caso que el cilindro de almacenamiento no esté lleno, en caso contrario, la potencia eólica residual será dirigida a la red trifásica, como se observa en la Figura 3.2. Si la demanda del nodo es mayor a la potencia eólica generada, la celda de combustible se activa y empieza a usar el hidrógeno del cilindro de almacenamiento para generar energía eléctrica que aumenta la posibilidad de que la demanda sea satisfecha en su totalidad. Si aun así la demanda no puede ser satisfecha en su totalidad, la red eléctrica será quien aporte el excedente necesario para cubrir la demanda requerida en ese instante de tiempo.

El modelo del sistema híbrido es implementado en un análisis de flujos de potencias convencional, integrando en el nodo Main el sistema híbrido y por tanto obteniendo las características de potencias de líneas, magnitudes y ángulos de voltaje en cada uno de los nodos, permitiendo observar el impacto que el sistema híbrido tendría en la red de 5, como se señala más adelante en la Sección 3.1.2 en la Figura 3.10 y en los resultados obtenidos.

3.1.1 Análisis de Resultados

i) Coeficiente de potencia

Inicialmente en el modelo de energía eólica se requieren calcular los diferentes parámetros para el cálculo de potencia activa extraída del aerogenerador, usando la ecuación (2.8), la Figura 3.3 muestra la curva de coeficiente de potencia calculada, por medio de las ecuaciones (2.11) y (2.12), para el generador “Gamesa G80-2.0MW” implementado en el presente modelo de sistema híbrido, tomando en cuenta la curva de potencia de dicho generador presentada en la hoja de datos del mismo como se presenta en el Apéndice C. La línea continua de la Figura 3.3 es la curva representada a partir de los datos originales del aerogenerador, mientras que la otra es la curva de coeficiente de potencia calculada para su posterior implementación en el modelo, como se observa, las dos curvas son idénticas, y la curva calculada solo tiene un error máximo del 0.01% con respecto a la original.

Como se puede observar en la Figura 3.3, la eficiencia mecánica del aerogenerador más alta (en este caso del 44% aproximadamente) se da a velocidades alrededor de 8 m/s, siendo esta la velocidad donde el aerogenerador convierte más eficientemente la energía del viento en electricidad.

ii) Datos de velocidad y dirección del viento

Tomando en cuenta los datos de velocidad de viento tomados a partir de mediciones de una estación anemométrica localizada en Campeche, y graficados en la Figura 3.4, se puede calcular la distribución Weibull y de igual manera la rosa de los vientos.

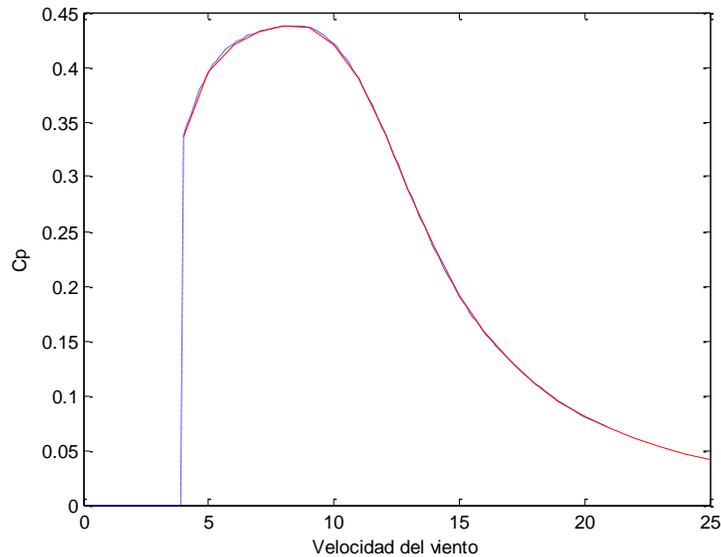


Figura 3. 3 Curva de coeficiente de potencia calculado para el generador Gamesa G80-2.0MW

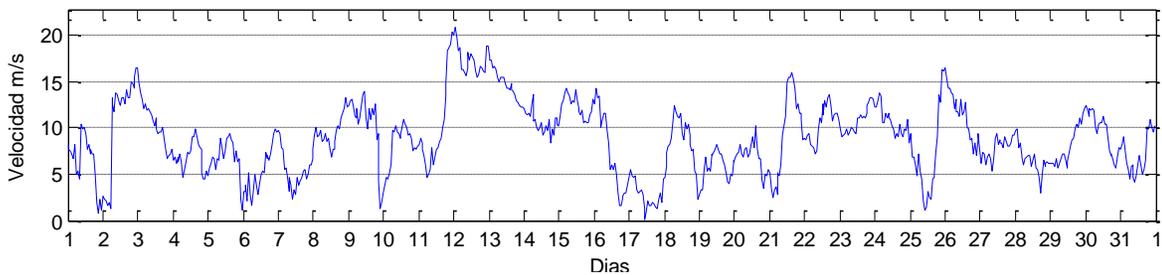


Figura 3. 4 Velocidad del viento en un mes (Enero, 2012)

iii) Distribución Weibull

Para calcular la distribución Weibull para la altura del generador seleccionado, primero se deben corregir las mediciones de velocidad de viento, teniendo en cuenta la rugosidad del terreno circundante y la altura a la que se desea estimar dicha corrección, tal como se explica en la sección 2.8.1, esto se realiza empleando la ecuación (2.9).

Teniendo las mediciones de viento corregidas, se procede a calcular la velocidad media y la distribución de Weibull usando la ecuación (3.2), como se observa en ésta, se deben tener en cuenta parámetros de escala (c) y forma (k), siendo la primera calculada con la ecuación (3.1) y la segunda se tomó para este caso $k=2$, observando la Figura 3.5.

$$c = \frac{V_{mean}}{\text{gamma} \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3.1)$$

dónde

V_{mean} es la velocidad del viento media

c es el factor de escala

k es el factor de forma

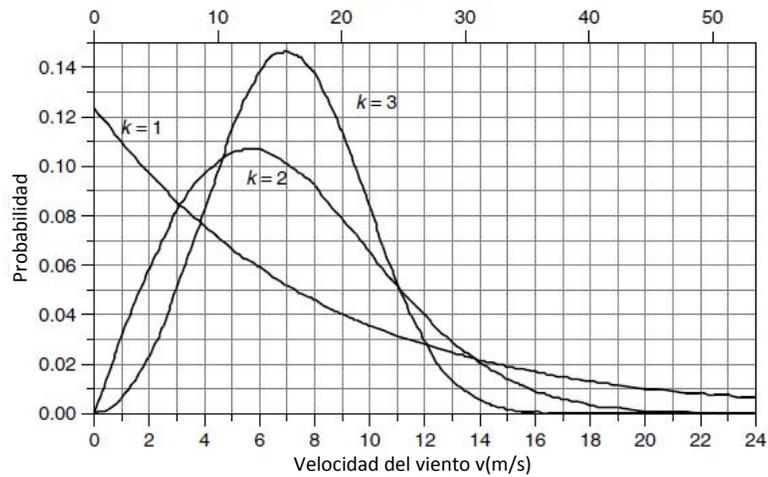


Figura 3. 5 Función de densidad de la probabilidad de Weibull con parámetro de forma $k=1, 2, \text{ y } 3$ (con parámetro de escala $c= 8$)

$$F_w(V_w) = \frac{k}{c} \left(\frac{V_{cor}}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V_{cor}}{c} \right)^k} \quad (3.2)$$

dónde

$F_w(V_w)$ es la distribución Weibull F_w , aplicada a la velocidad del viento V_w
 V_{cor} es la velocidad del viento corregida

Teniendo como resultado en este caso, la distribución Weibull mostrada en la Figura 3.6, en la que se puede ver que la mayoría de viento está sobre los 7 m/s.

iv) Rosa del viento

La rosa de los vientos fue anteriormente explicada en la Sección 2.2.3. Para encontrar la rosa de los datos de viento usados en este caso, se hizo uso de la función rose en Matlab, aplicada a los datos de dirección de viento, obteniéndose la Figura 3.7, donde se observa que la mayoría del viento proviene de los 30° según la figura, o sea en dirección Noreste.

v) Potencia activa y reactiva del aerogenerador

Cuando todos los parámetros han sido calculados y teniendo la velocidad del viento corregida, por medio de la ecuación (2.8) se puede encontrar la potencia activa generada por el aerogenerador, cuyo resultado se observa en la Figura 3.8, e implementando el método de factor de potencia se puede obtener la potencia reactiva requerida por el generador eólico mostrada en la Figura 3.9.

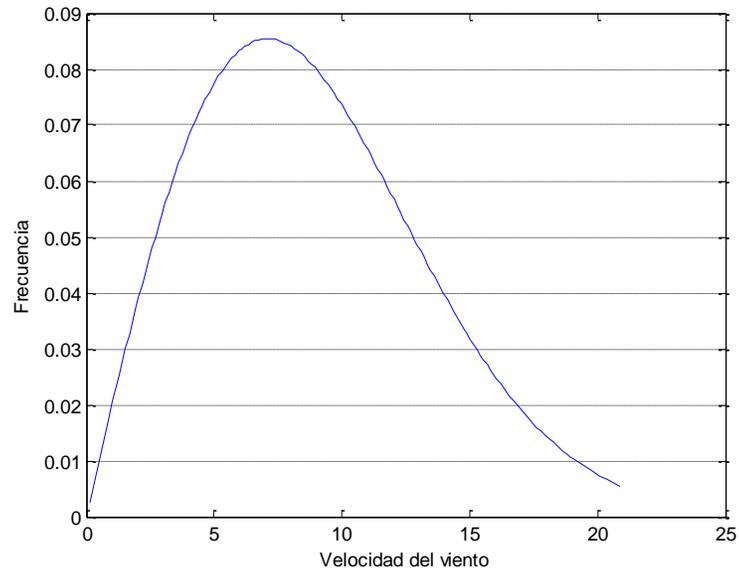


Figura 3. 6 Distribución de Weibull

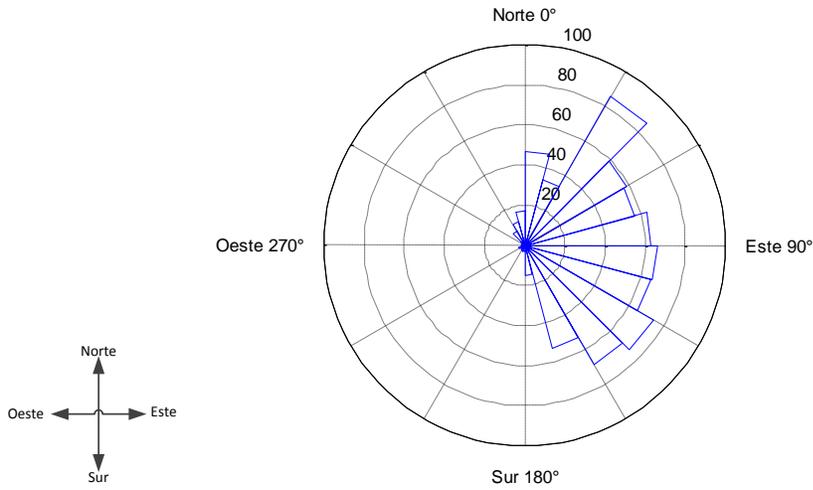


Figura 3. 7 Rosa del viento

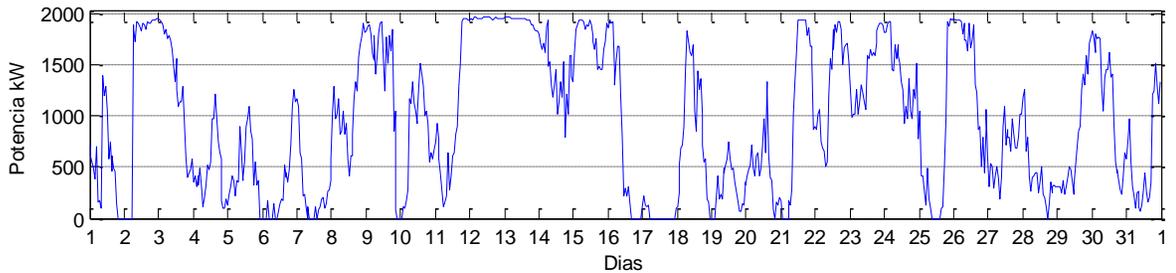


Figura 3. 8 Potencia activa extraída del aerogenerador

Todos los resultados aquí obtenidos de los modelos propuestos fueron validados con las metodologías presentadas por Ángeles-Camacho C. y Bañuelos F. [1], las cuales hablan del punto de partida en la obtención de la potencia eólica, ecuación (2.8), y la forma en que diferentes métodos pueden ser implementados en la corrección de la velocidad del viento a diferentes alturas.

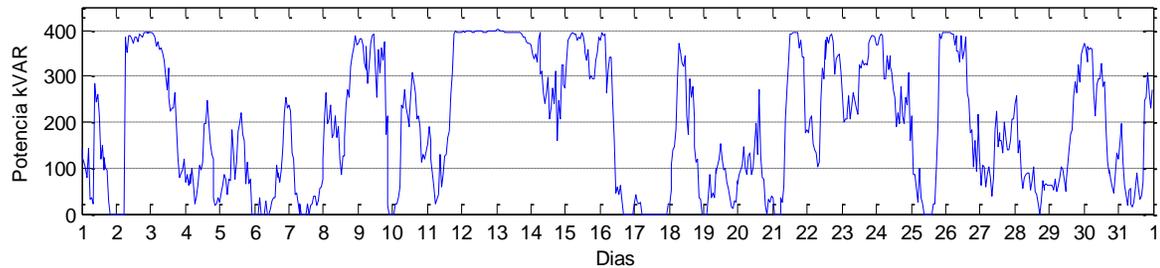


Figura 3. 9 Potencia reactiva del aerogenerador

3.1.2 Análisis de Resultados de Flujos Continuos

Para observar el comportamiento del sistema modelado bajo un entorno de red se utilizará un sistema pequeño de 5 nodos, 7 líneas, 4 cargas y dos generadores convencionales. El sistema híbrido en primera instancia se conectará con la idea de suministrar su energía a la carga local en soporte de conexión, como se observa en la Figura 3.10.

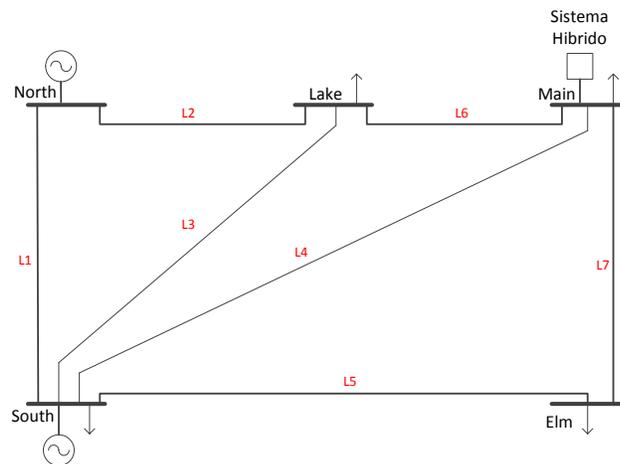


Figura 3. 10 Diagrama de red de cinco nodos con conexión del sistema híbrido

El sistema híbrido consiste de un aerogenerador de 2 MW con una celda de combustible de 0.4 MW tal como se mencionó en la Sección 2.9, la interacción entre estos elementos para el sistema híbrido fue expuesto en la Sección 3.1 y también se puede observar el diagrama de flujos de dicho sistema en las Figuras 3.1 y 3.2.

En la Figura 3.10 se observa la red eléctrica trifásica balanceada que se tomó en cuenta para el análisis de la influencia que tiene el sistema híbrido cuando se conecta a una red, como se observa el sistema fue conectado en el nodo Main, donde también se cuenta con una demanda, siendo esta la prioridad inicial a suplir por el híbrido, como se dijo anteriormente al principio de la sección 3.1. Todas las demandas activas se consideran iguales con una base de 2 MW oscilando entre 1.6 MW y 2.8 MW, a excepción de la del nodo Main con una base promedio de 0.7 MW oscilando entre 0.5 MW y 0.93 MW variables en el tiempo, siendo representadas en la Figura 3.11 donde se muestran las demandas por fase.

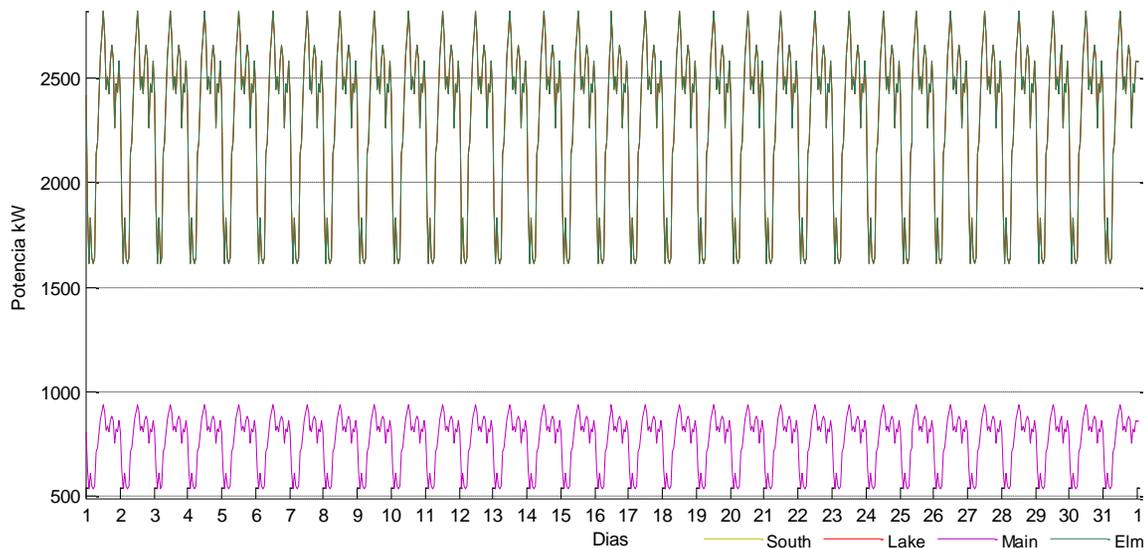


Figura 3. 11 Curvas de demanda activa en nodos en red

Inicialmente se actualizó un programa de flujos de potencia convencional codificado en Matlab [2], para determinar los flujos de potencia en la red. Se recuerda que en la red el slack está en North y se obtiene un primer resultado en la potencia suministrada por los generadores de la red, el cual se muestra en la Figura 3.12. Se debe tener en cuenta que para conectar el sistema híbrido a la red, la potencia a inyectar se dividió en tres para mantener el balance de las fases en la red y no desbalancearla conectando toda la potencia generada por el mismo en una sola fase, debido a esto en la Figura 3.12 se observa la inyección por parte del sistema híbrido a la red demasiado pequeña, en este caso representa solo el 7% de penetración en el sistema. En un escenario algo extremo, se redujeron las demandas a la tercera parte del caso original obteniendo un resultado erróneo en el funcionamiento del slack, como se muestra en la Figura 3.13; en este caso, el sistema híbrido alcanzó ahora un 13.1% de penetración, lo que implicó que en algunos instantes de tiempo el generador slack actuara como carga para balancear la red eléctrica. La línea de menor valor representa la generación entregada a la red por el sistema híbrido después de suplir la demanda del nodo Main, la línea que se mantiene en 4 MW es el generador en South y la superior el generador del slack (North).

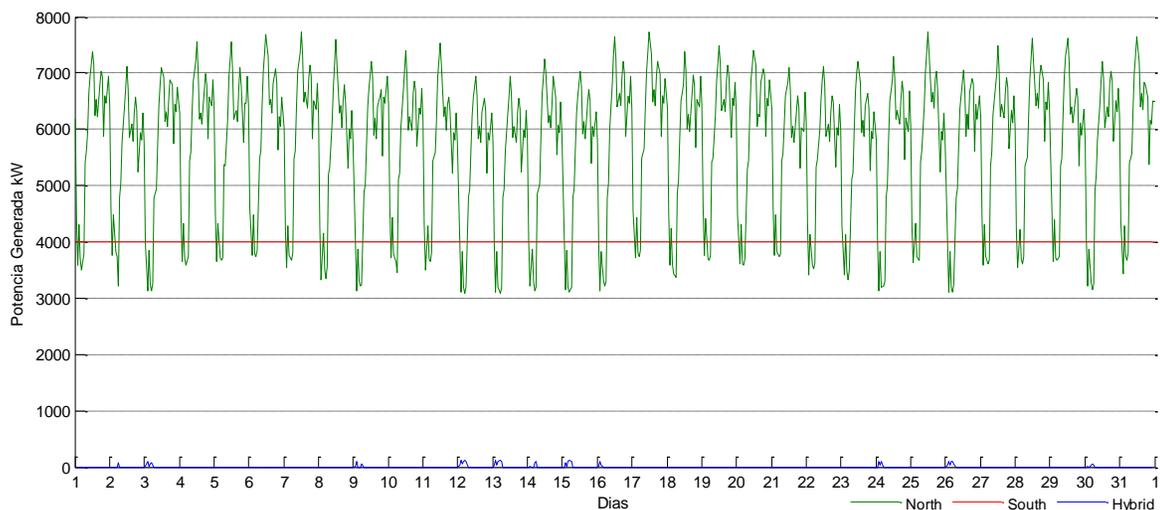


Figura 3. 12 Curvas de potencia activa de los generadores de la red

Se puede notar en la Figura 3.13 que cuando se incluye la generación de potencia del sistema híbrido, el slack algunas veces pasa de comportarse como generador a carga (demanda), por lo que es una anomalía que no debe de suceder y para arreglarlo se debe modificar el programa de análisis de flujos de potencia, para que tenga en cuenta que el valor que se sobrepasa de bajo-cero del slack se le reste al generador de South (ya que este generador es invariable), con esto se compensa la generación del slack y la deja a cero cuando no tiene necesidad de generar.

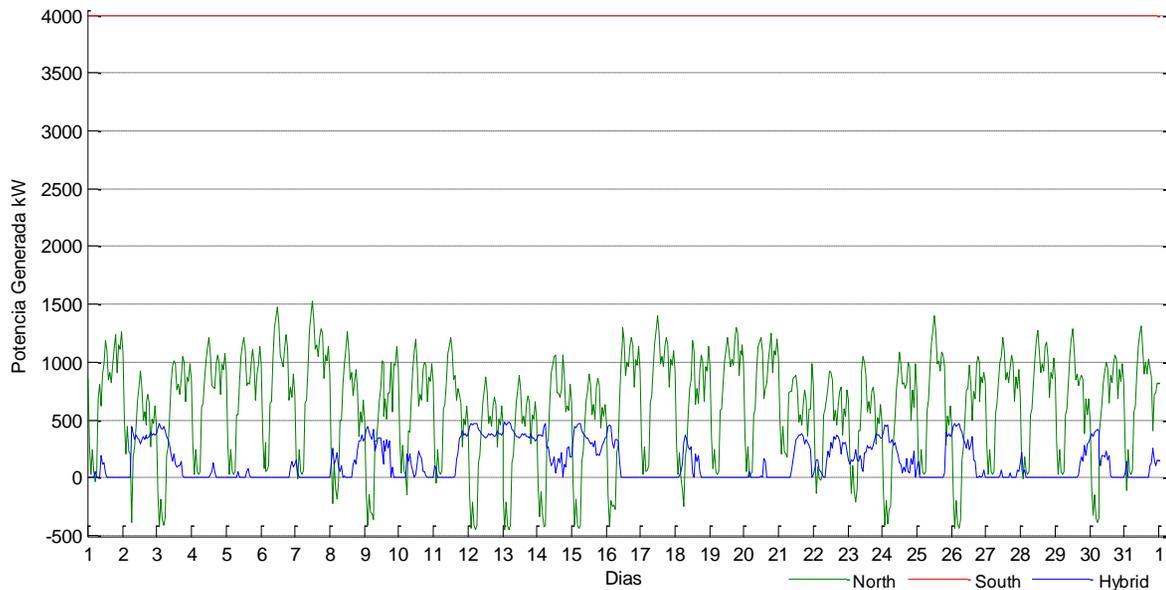


Figura 3. 13 Curva de potencia activa de los generadores de la red con demandas al tercio del original

Esta anomalía sucede en el momento en que todas las demandas están a su valor más bajo, por lo que la generación total es mayor que la demanda requerida por la red de cinco nodos, en consecuencia, el slack se convierte en carga para equilibrar el sistema, debido a la generación eléctrica que sobrepasa la demanda total de la red en esos momentos.

En la realidad, cuando sucede este tipo de casos, se quita generación eléctrica del punto más costoso de generación, debido a la no existencia de un slack, siendo que el anterior procedimiento disminuye los costos de producción en el lapso en que dure el sobrepaso de generación eléctrica con respecto a la demanda requerida por el sistema.

Habiendo modificado el programa para que el generador en South también varíe en el tiempo según sea necesario, para el caso de demandas demasiado bajas, se obtienen los resultados del comportamiento de los generadores en la red de la Figura 3.14, donde se puede observar que el slack al igual que el generador en South varía con respecto al tiempo reduciendo su generación para estos casos.

En cuanto a costo de venta teniendo en cuenta que en el año 2012 el precio de la energía Eolo-eléctrica era de MX\$1.09 kWh y teniendo en cuenta que para este caso se está tomando los datos de un mes de 31 días, se calcula una venta de potencia eléctrica a la red pública de MX\$10,101.90. Lo anterior asumiendo que la potencia generada por la FC es consumida por la demanda del nodo Main y por lo tanto la potencia que se inyecta a la red pública es exclusivamente proveniente del aerogenerador.

Se debe tener en cuenta que el comportamiento de generación del sistema híbrido de la Figura 3.12, tan solo muestra la potencia que es inyectada a la red eléctrica por fase, más no la totalidad de generación del mismo. La Figura 3.15 muestra la potencia activa de generación eólica a lo largo de un mes, también se observa la variación existente en la generación eléctrica de la celda de combustible, estos dos tipos de potencia activa son las que componen el sistema híbrido eólico-hidrógeno con integración de la celda de combustible y al ser unidas conforman la potencia resultante del sistema representada por la línea que siempre es de mayor valor de dicha figura, en esta, se puede observar la interacción de la generación eólica con la potencia generada por la FC.

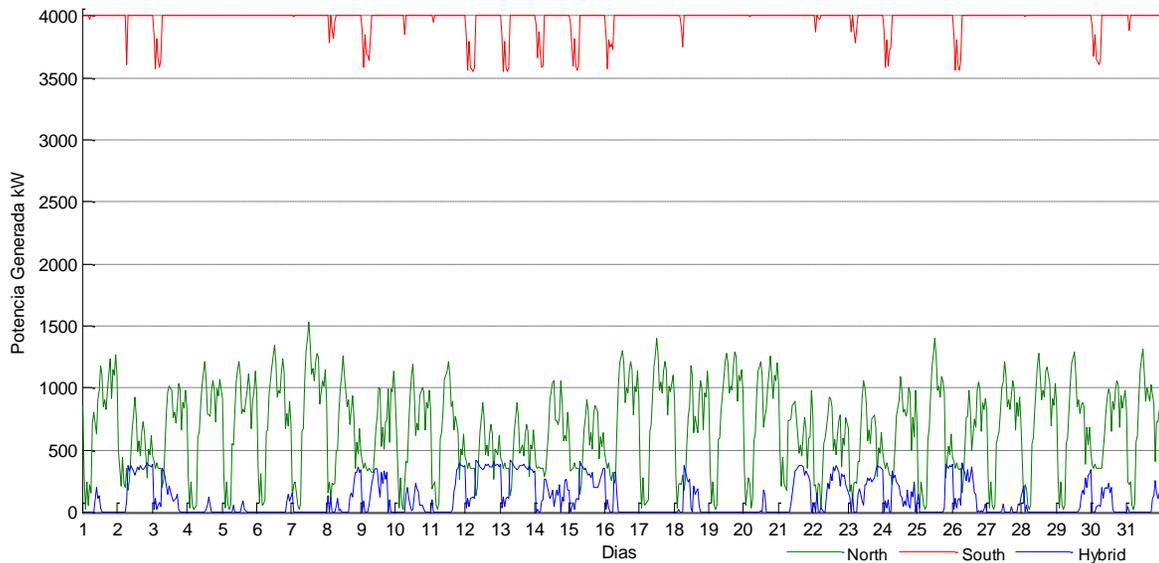


Figura 3. 14 Curvas de comportamiento de potencia activa de los generadores en la red con demandas al tercio del original

Observando la Figura 3.15, se puede notar que existieron momentos en que la celda de combustible no tuvo generación eléctrica alguna, estos lapsos de tiempo fueron debido a diferentes factores, tales como el hecho de que en el momento de requerir el hidrógeno necesario para suplir la celda de combustible, este no existiera en ese instante o que en realidad no era requerido en ese intervalo de tiempo el funcionamiento de la celda de combustible, esto se puede notar al comparar las Figuras 3.15, 3.16, donde se exponen la demanda del nodo Main (teniendo en cuenta las 3 fases) y la potencia activa total del sistema híbrido y la Figura 3.17, en la que se muestran los cambios que existieron a lo largo del mes en el hidrógeno, tal como generación, estado de almacenamiento y el consumo del mismo al suplir la celda de combustible.

De las Figuras 3.16 y 3.17 se deduce que la generación de hidrógeno se llevó a cabo en los momentos en que la potencia del sistema híbrido (línea inferior de la Figura 3.16) sobrepasaba la demanda del nodo Main (línea superior de la Figura 3.16), estos momentos de generación se pueden observar en la Figura 3.17 representados por la línea “VolH2generado”, y al mismo tiempo se tiene una inyección de potencia por parte del sistema híbrido a la red eléctrica señalada en las Figuras 3.14 (línea de menor valor) y 3.18 (línea que llega a tener valores cero), esta potencia inyectada es la potencia residual debido al consumo por parte de la demanda del nodo en ese instante, al igual que por parte del electrolizador en el momento de generar hidrógeno (línea “H2usage_{L/h}” de la Figura 3.17) para su

posterior almacenamiento (representado por la línea “StoreH2” en la Figura3.17, con los valores más altos).

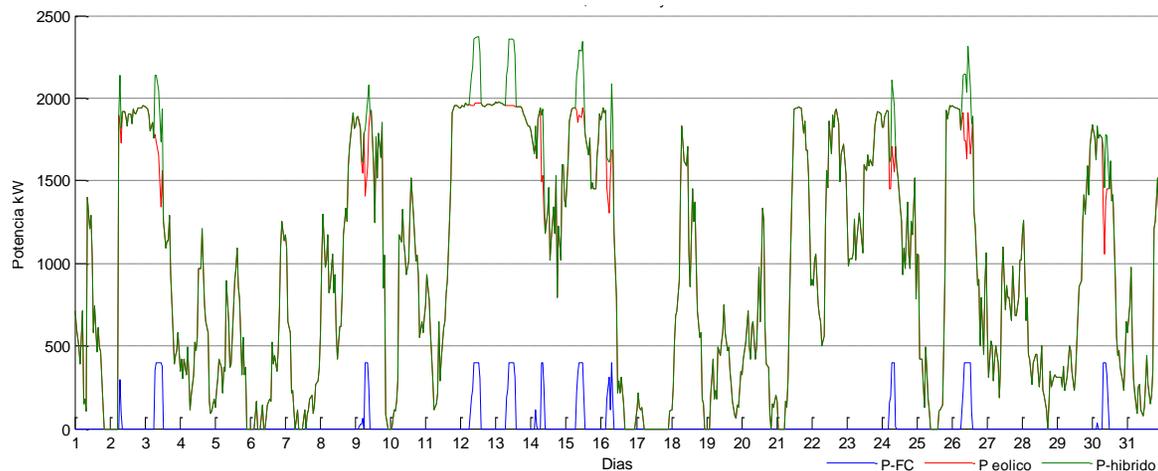


Figura 3. 15 Curvas de potencia activa del generador eólico, FC y total del sistema híbrido

En los momentos en que la demanda es mayor a la generación por parte del sistema híbrido, la FC genera potencia activa para ayudar a suplir la demanda requerida en ese momento, pero debido a que el funcionamiento de la FC depende directamente de la cantidad de hidrógeno que exista almacenado, se puede decir que el límite de producción de energía eléctrica está ligado a la cantidad de hidrógeno producido y del que exista almacenado por lo que no tiene un funcionamiento continuo de generación eléctrica, lo cual sería ideal, lo anterior se puede observar confrontando las Figuras 3.16 y 3.17.

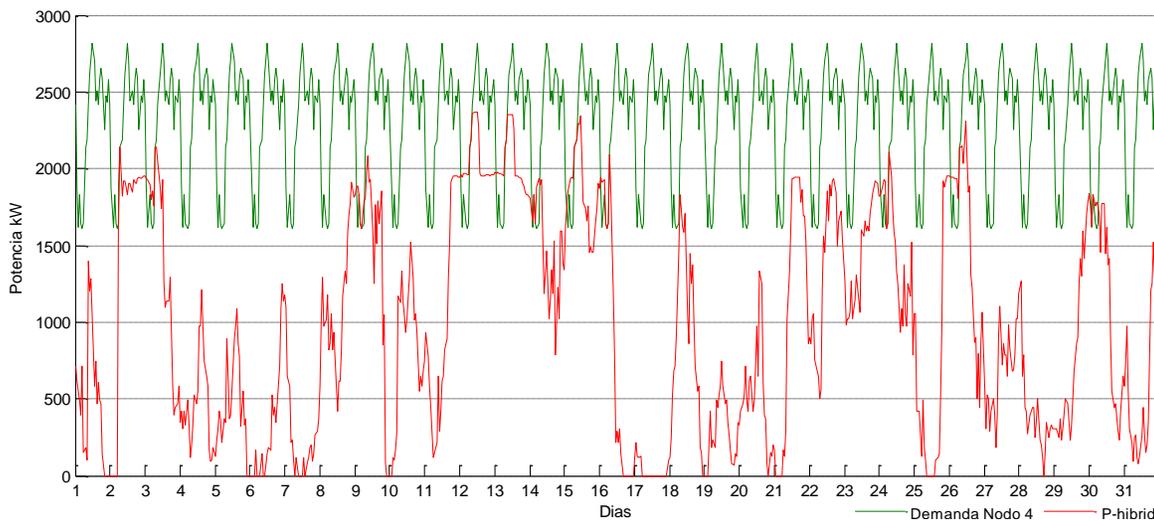


Figura 3. 16 Curvas de demanda de potencia activa total del nodo Main y potencia activa generada por el sistema híbrido

La Figura 3.18 muestra como la demanda del nodo Main se modifica de su forma original (línea superior) a lo largo del tiempo debido a que es suplida por la potencia generada proveniente del sistema híbrido, quedando como resultante la demanda que no alcanza a cubrir dicho sistema, línea inferior de la Figura, se observan también valores negativos en la demanda resultante lo cual significa la potencia que el sistema híbrido inyecta a la red, por lo que ante la red eléctrica, ésta demanda va a ser diferente a

las demandas de los demás nodos de la red como se puede observar en la Figura 3.19, donde se muestran las demandas de todos los nodos desde el punto de vista de la red eléctrica por fase.

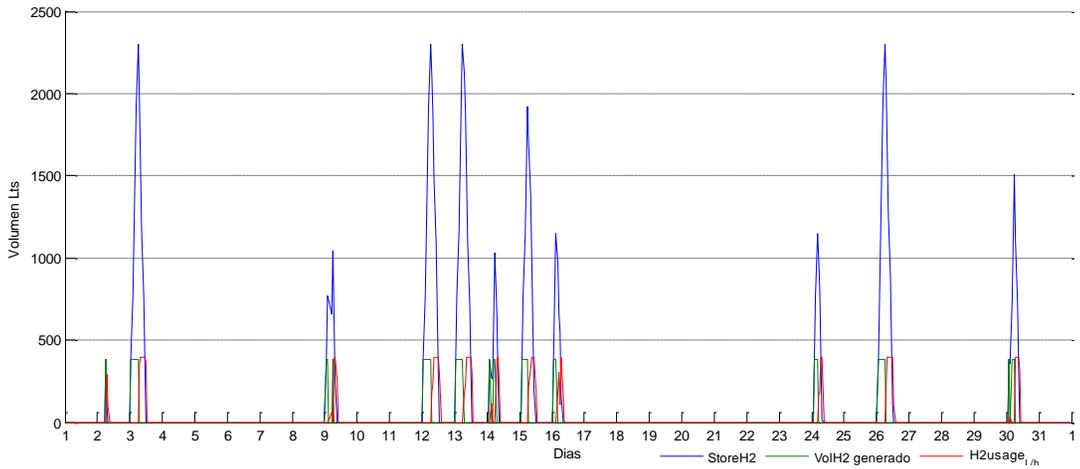


Figura 3. 17 Curvas de generación, almacenamiento y gasto de hidrógeno

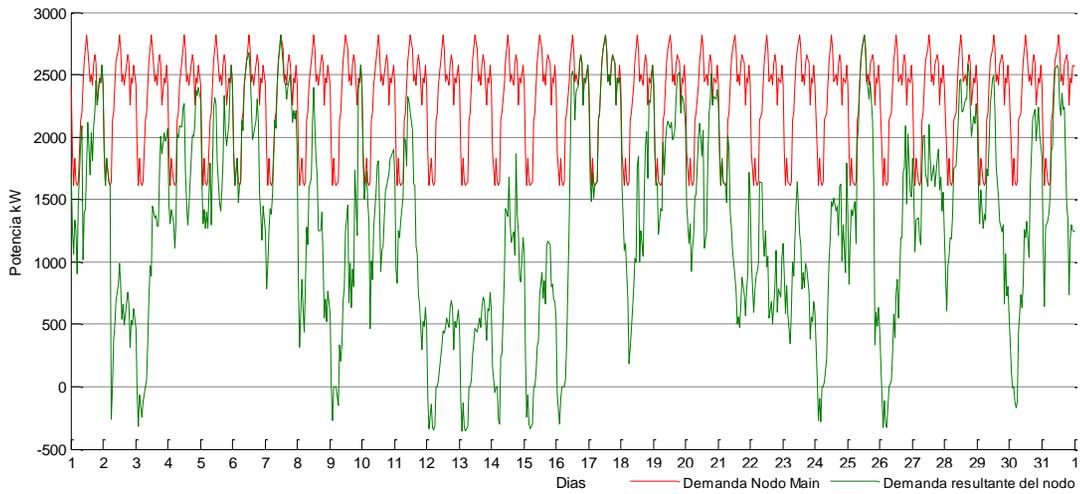


Figura 3. 18 Curvas de demanda total del nodo Main y demanda resultante del nodo Main

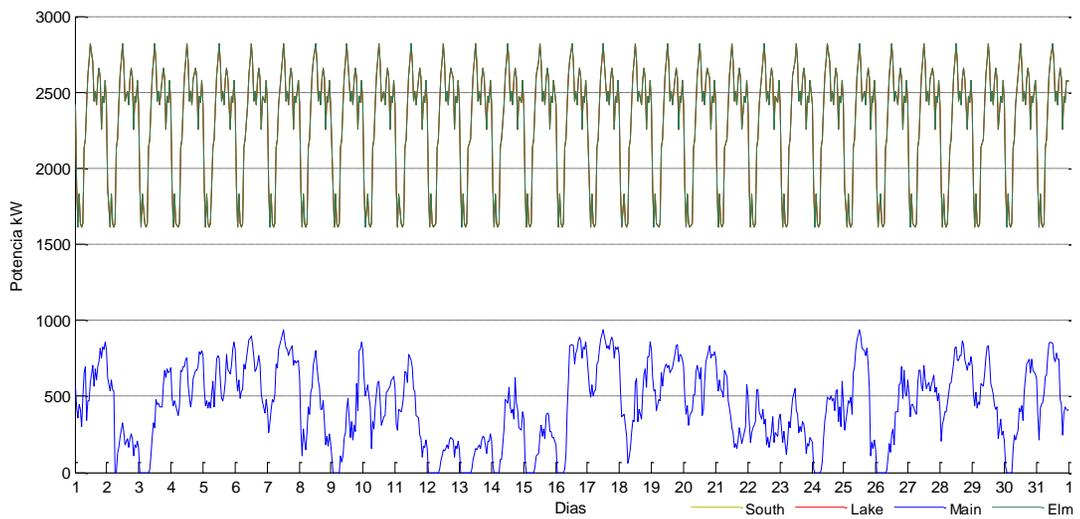


Figura 3. 19 Curvas de demandas de nodos de red eléctrica

Analizando los voltajes nodales de la Figura 3.20, se observa que el slack y el nodo South siendo nodo PV, se mantienen en 1.06 pu y 1 pu respectivamente, los nodos Lake, Main y Elm se encuentran en valores de alrededor de 1.02, 1.018 y 1.008 respectivamente. Realizando un acercamiento a uno de los voltajes de nodo y teniendo en cuenta que todos los voltajes de nodo presentan formas similares, la Figura 3.21 muestra exclusivamente el voltaje en el nodo Main, esto para poder analizar a más detalle las variaciones existentes en el voltaje nodal. Observando la demanda aplicada a los nodos, línea superior de la Figura 3.19 y comparándola con la 3.21, una de las primeras diferencias que se presentan es que las dos graficas son opuestas en forma, esto quiere decir que a mayor demanda en los nodos, los voltajes nodales van a presentar una disminución, pero se debe tener en cuenta que la demanda no varía en cuanto al contorno como lo hace el voltaje nodal, debido a que el voltaje nodal varía según la demanda y la variación de la potencia del sistema híbrido (básicamente resta la demanda de la potencia del sistema híbrido, hablando de sus formas), el contorno tiende a variar y no se mantienen lineal sino que se aproxima a la forma de la potencia del sistema híbrido de la Figura 3.16, línea inferior.

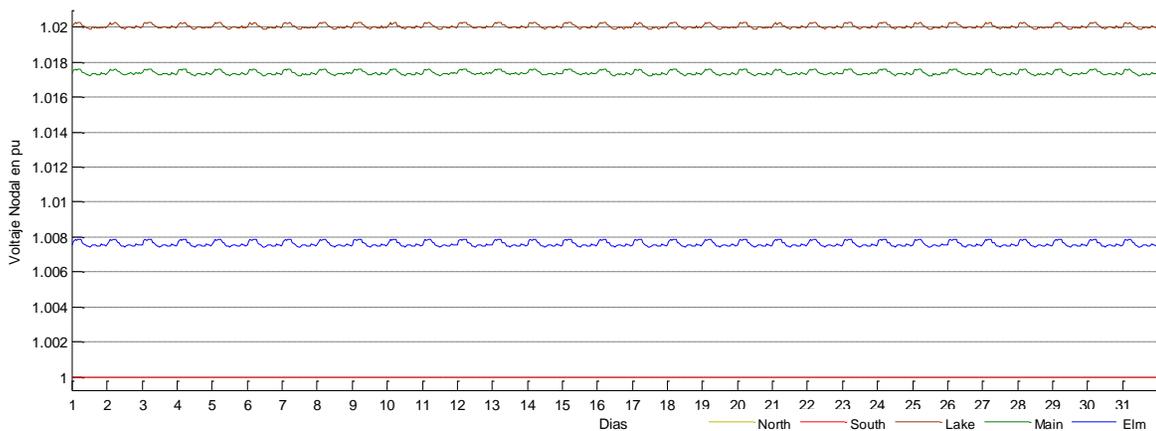


Figura 3. 20 Curvas de magnitudes de voltajes nodales

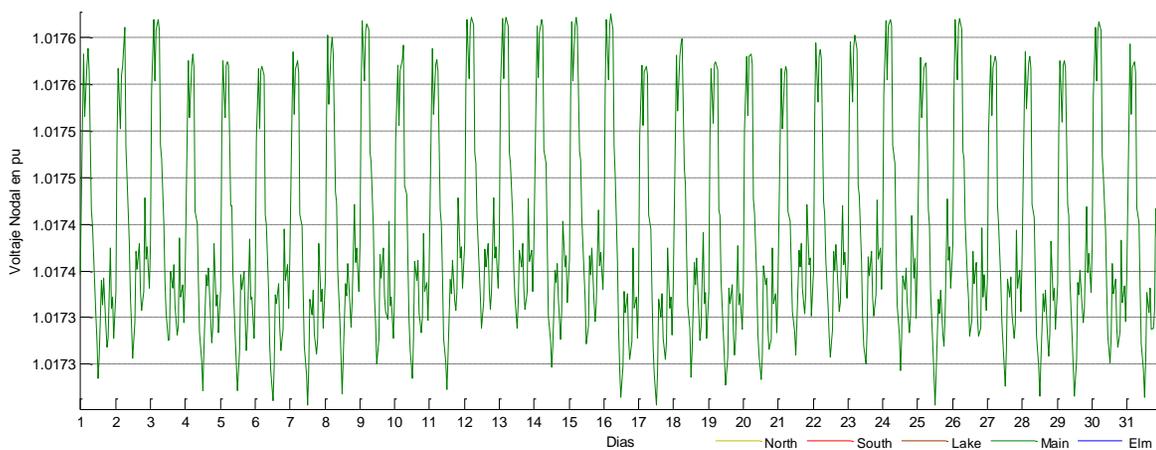


Figura 3. 21 Curvas de magnitudes de voltaje en el nodo Main

La Figura 3.22 es la respuesta que se presenta en las líneas de transmisión de la red eléctrica. Lo primero que se puede notar es que existen muchos cruces por cero principalmente para la línea que va de Lake a Main (línea más inferior de la Figura 3.22, “L6” de la Figura 3.10). Por otro lado, si se toma en cuenta el caso en que las demandas son el tercio del caso original, como en la Figura 3.23, se puede notar que no solo la línea antes mencionada ahora está bajo cero, sino que también la que va de North a

South (línea que cubre más rango de variación de la Figura 3.23, “L1” de la Figura 3.10) y en menor frecuencia en la línea que va de Main a Elm (línea más cercana a cero de la Figura 3.23, “L7” de la Figura 3.10).

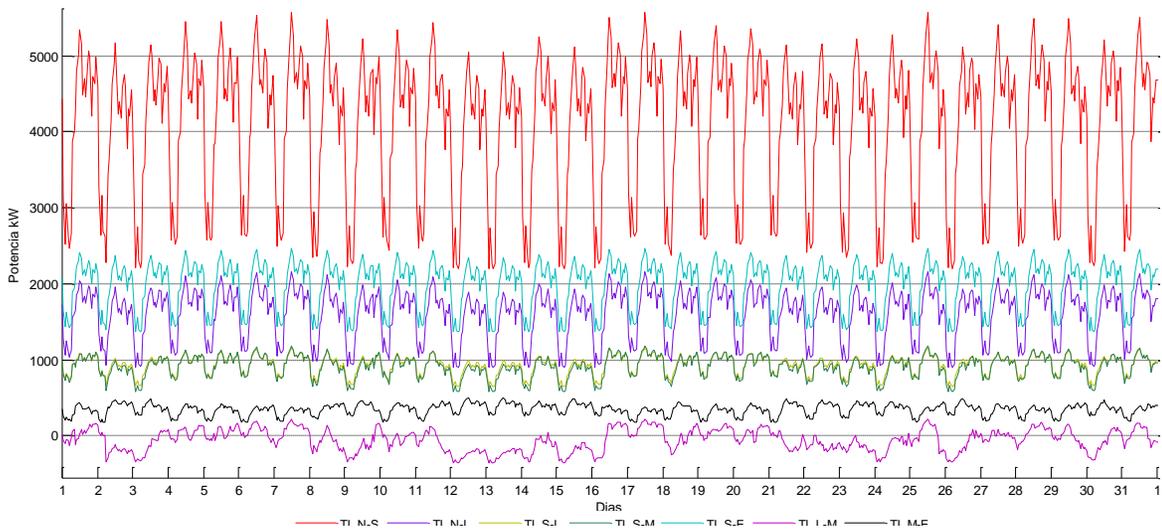


Figura 3. 22 Curvas de potencia activa enviada en las líneas de transmisión

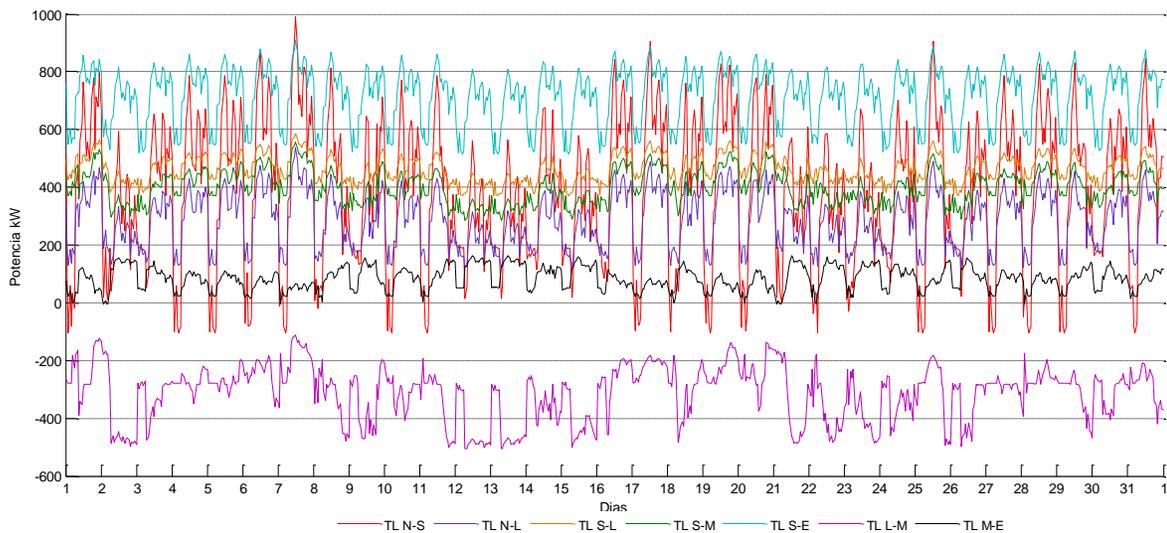


Figura 3. 23 Curvas de potencia activa enviada en las líneas de transmisión con demandas al tercio del original

Los cruces por cero de las potencias en las líneas de transmisión, indican que la dirección del flujo de potencia cambia, esto sucede en los momentos en que existe más penetración por parte del sistema híbrido, las ventajas que se presentan debido a este suceso es que la cargabilidad de las líneas mejora al suministrarse una energía localmente, generación distribuida.

A continuación se realizaron variaciones del caso base a saber, con el propósito de dar a conocer lo sucedido con diferentes niveles de penetración por parte del sistema híbrido, así como ventajas y/o desventajas que se puedan presentar, mostrar como una fuente variable cuando tiene mayor penetrabilidad va a afectar de mayor forma todos los parámetros de la red eléctrica, al igual que en el

caso contrario, en el primero la demanda local se incrementa sobrepasando la generación del sistema híbrido, mientras que el segundo escenario es el caso opuesto al primero.

Escenario 1: Caso en que la demanda local sobrepasa totalmente la generación del sistema híbrido

En este escenario las demandas de todos los nodos se incrementa en un factor de 1.7, por lo que en este caso, la demanda del nodo Main está variando entre 2.68 MW y 4.69 MW, sobrepasando la generación del sistema híbrido, como se muestra en la Figura 3.24, se hace para comparar los resultados en diferentes escenarios, así como más adelante se analizara y compararan los datos en el escenario en que la demanda es sobrepasada por la generación del sistema híbrido.

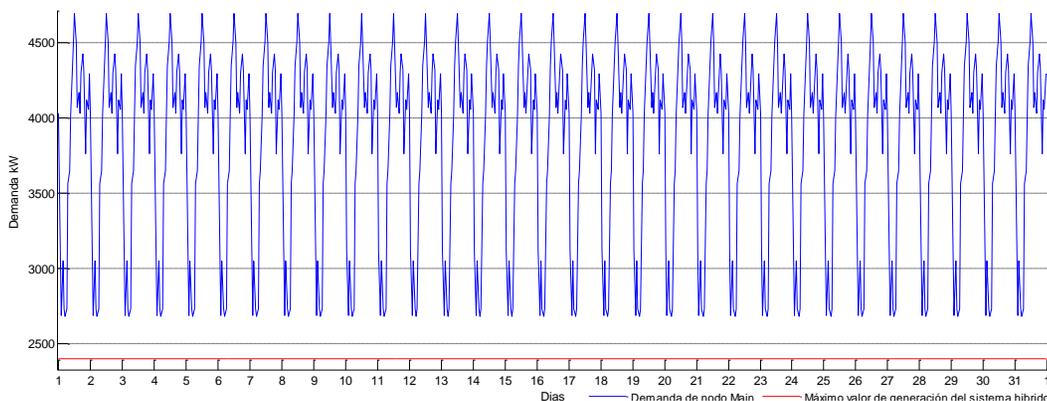


Figura 3. 24 Escenario en que la demanda sobrepasa la generación del sistema híbrido, nodo Main

Como era de esperarse comparando los resultados obtenidos cuando la generación del sistema híbrido es casi proporcional a la demanda con los ahora mostrados, se observa que la potencia de las líneas, Figura 3.25, que en la línea North a South se aumenta la potencia de transmisión, esto debido al aumento en la demanda de todos los nodos de la red eléctrica, el mismo fenómeno ocurre en las demás líneas, aunque la línea que va de Lake a Main originalmente tenía cruces por cero como se ve en la Figura 3.22, para este escenario estos cruces se ven disminuidos, se puede observar que la magnitud de potencia activa transmitida por las líneas es positiva casi en su totalidad.

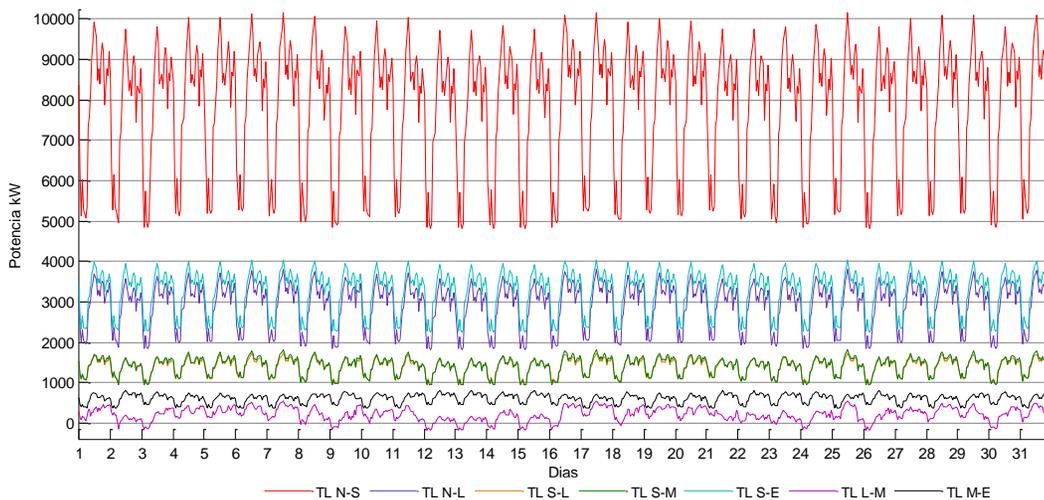


Figura 3. 25 Curvas de potencia activa enviada en las líneas de transmisión para el escenario 1

Los valores pu de los voltajes nodales de la Figura 3.26 presentan una disminución mínima comparándolos con los obtenidos anteriormente de la Figura 3.20. En cuanto a la forma, la variación de su contorno es menor en comparación con la Figura 3.21 y se puede observar que para el caso del nodo Main el valor del voltaje nodal ahora oscila entre 1.0167 y 1.0173 pu aproximadamente, lo cual representa una disminución en la magnitud según los resultados de la Figura 3.21, el rango de oscilación se ve incrementado, esto debido a que las demandas de los nodos fueron aumentadas en la red y que el sistema híbrido no inyecta potencia a la red eléctrica en este escenario como se puede ver en la Figura 3.27.

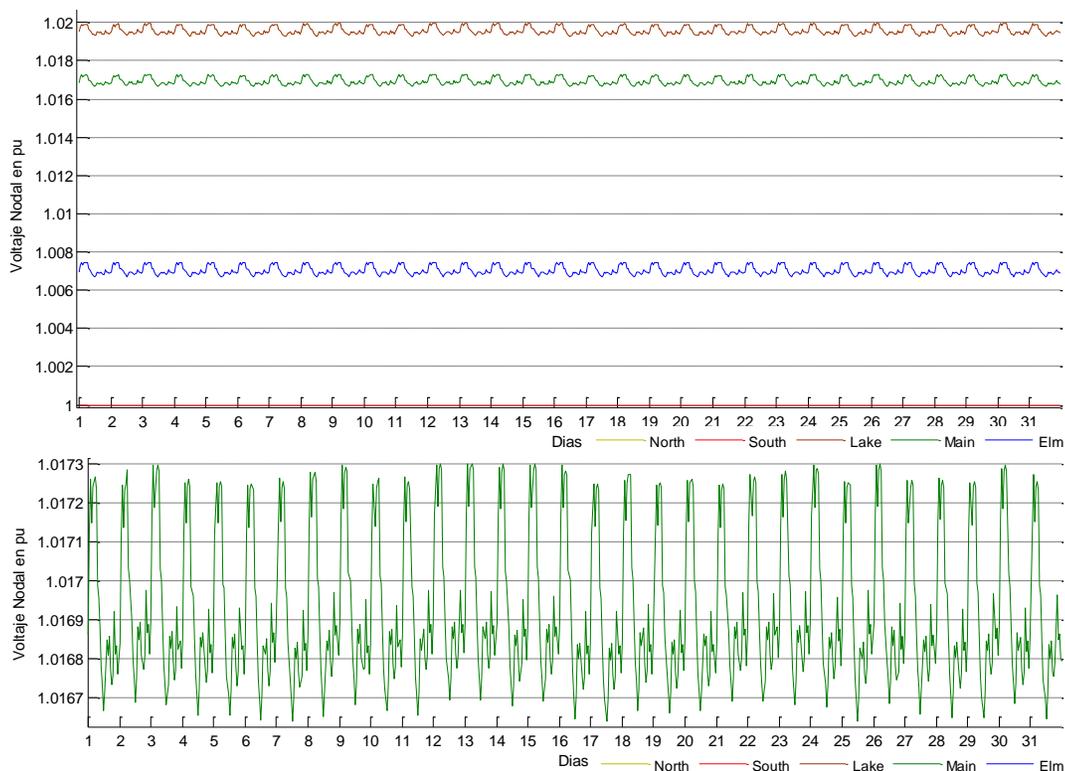


Figura 3. 26 Curvas de magnitudes de voltajes nodales y del nodo Main para el escenario 1

Como se observa en la Figura 3.27, el generador del nodo slack (North) en ningún momento deja de generar y debido a que el sistema híbrido en ningún momento puede inyectar potencia a la red eléctrica, esto en consecuencia a que en ningún momento puede abastecer en su totalidad la demanda del nodo Main para este escenario como se observa en la Figura 3.28, y por tanto el generador en North siempre estará generando casi al doble en comparación con el caso original.

Por lo anterior, se puede deducir que los costos de generación no van a ser disminuidos significativamente en la red eléctrica, aunque en el nodo Main si existe una disminución de costos ya que se consume potencia de la red pública en menor cantidad, como se muestra en la Figura 3.28a, debido a la generación del sistema híbrido conectado en este punto. Se debe tener en cuenta que en este escenario, en ningún momento se vende energía eléctrica a la red pública por la no existencia de inyección por parte del sistema híbrido a dicha red.

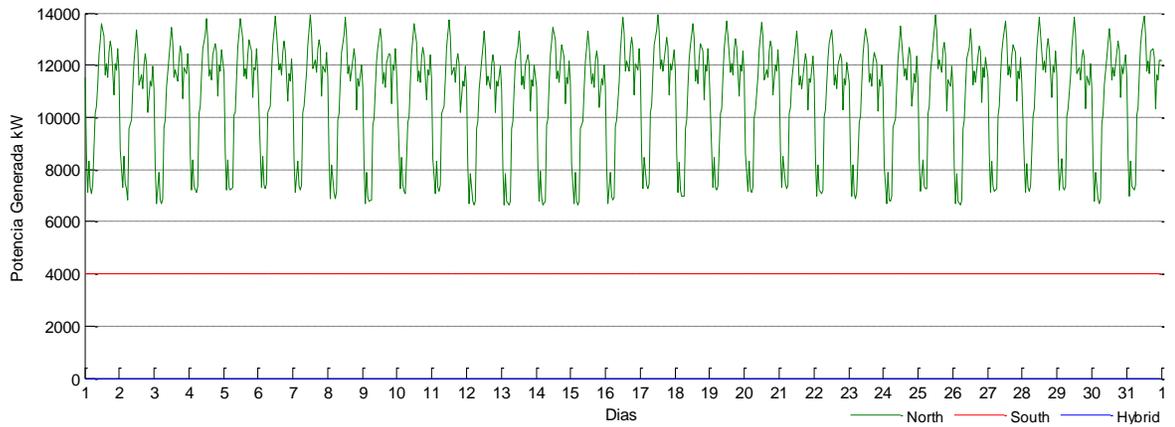


Figura 3. 27 Curvas de potencia activa de los generadores de la red para el escenario 1

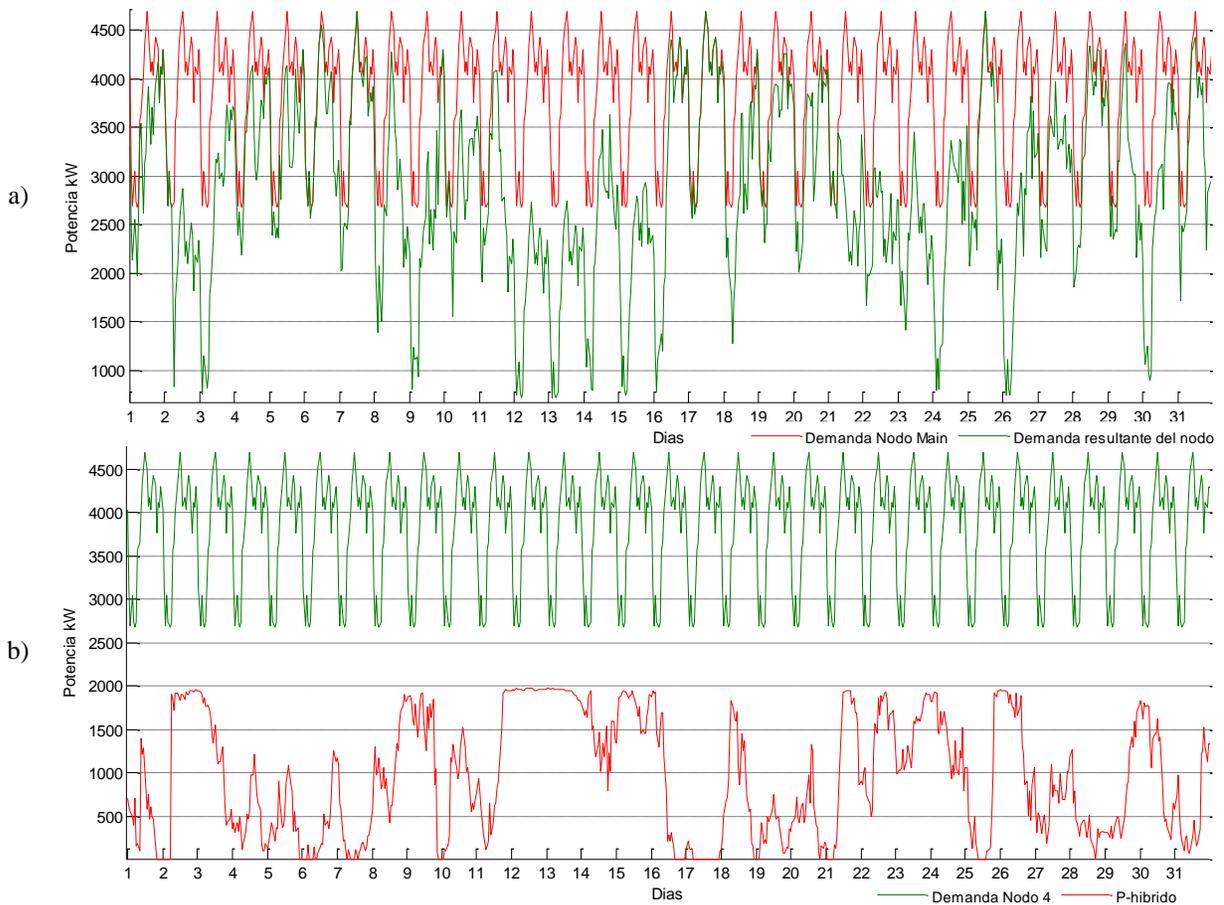


Figura 3. 28 a) Curvas de demanda total del nodo Main y demanda resultante del nodo Main b) Curvas de demanda de potencia activa total del nodo Main y potencia activa generada por el sistema híbrido para el escenario 1

En las Figuras 3.28y 3.29 se muestra como en consecuencia de que la generación eólica nunca supera la demanda del nodo donde está conectado, no existe potencia para generar hidrógeno según la configuración establecida, como se muestra en la Figura 3.29b, y por tanto en ningún momento la FC puede ayudar a suplir la demanda como se expone en la Figura 3.29a.

Escenario 2: Caso en que la generación del sistema híbrido sobrepasa totalmente la carga local

En este escenario las demandas de todos los nodos se decrecienta en un factor de 0.55 por lo que para este escenario las demandas varían entre 0.94 MW y 1.57 MW, la Figura 3.30 muestra la demanda y potencia máxima generada por el sistema híbrido en un escenario 2, teniendo en cuenta que la demanda de todos los nodos se ha disminuido en comparación a los casos anteriores, se puede observar en la Figura 3.31, como la potencia en líneas de transmisión ha disminuido y como la línea que va de Lake a Main ha cambiado de dirección en el envío de potencia, esto debido a la disminución de demandas antes mencionada para este escenario y también a que el sistema de generación híbrido ahora presenta mayor penetración en la red eléctrica.

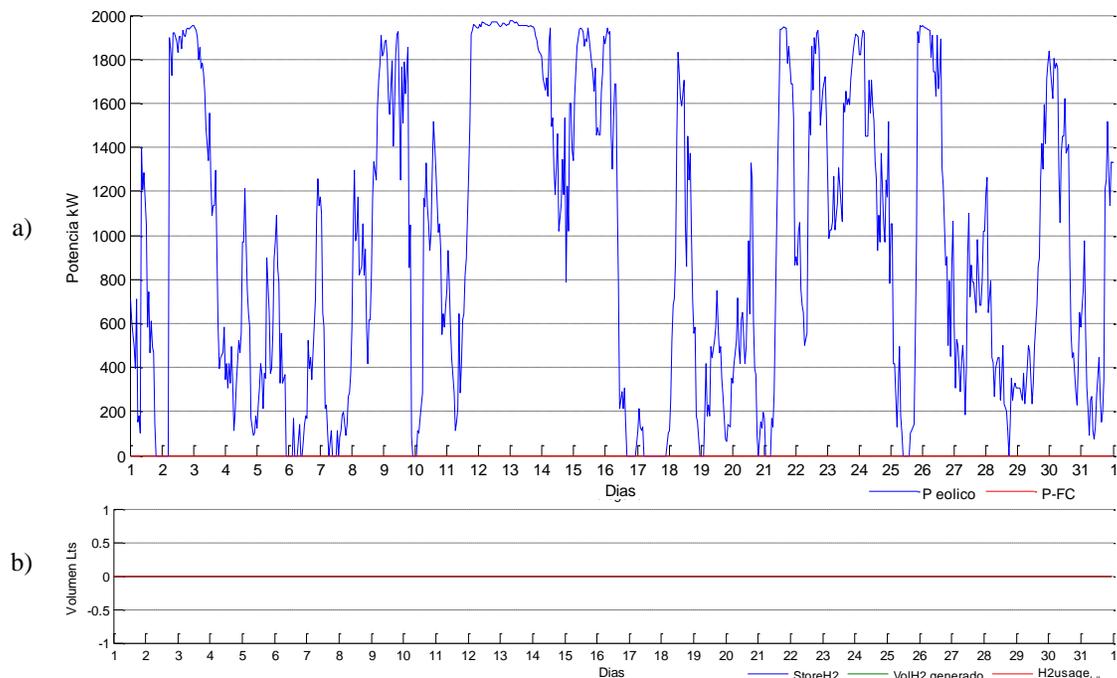


Figura 3. 29 a) Curvas de potencia activa del generador eólico y FC b) Curvas de generación, almacenamiento y gasto de hidrógeno para el escenario 1

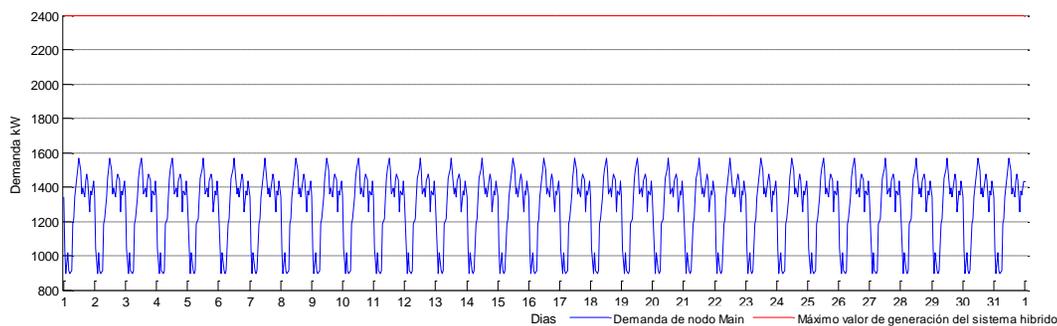


Figura 3. 30 Escenario en que la generación del sistema híbrido sobrepasa la demanda, nodo Main

Los voltajes nodales para este escenario no presentan una variación importante ya que permanecen aproximadamente igual al escenario anterior y el caso de estudio original, como se observa en la Figura 3.32a, en el nodo Main el rango de oscilación del voltaje es de aproximadamente 1.01736 pu a 1.01785

pu, observado en la Figura 3.32b, presentándose un muy leve incremento en la magnitud con respecto al caso de estudio original como se muestra en la Figura 3.21, por otro lado, el contorno tiende a ser más variable que el del caso original, esto como resultado de la más alta inyección de potencia por parte del sistema híbrido a la red eléctrica, lo cual implica que menor potencia tendrá que transmitirse por el sistema.

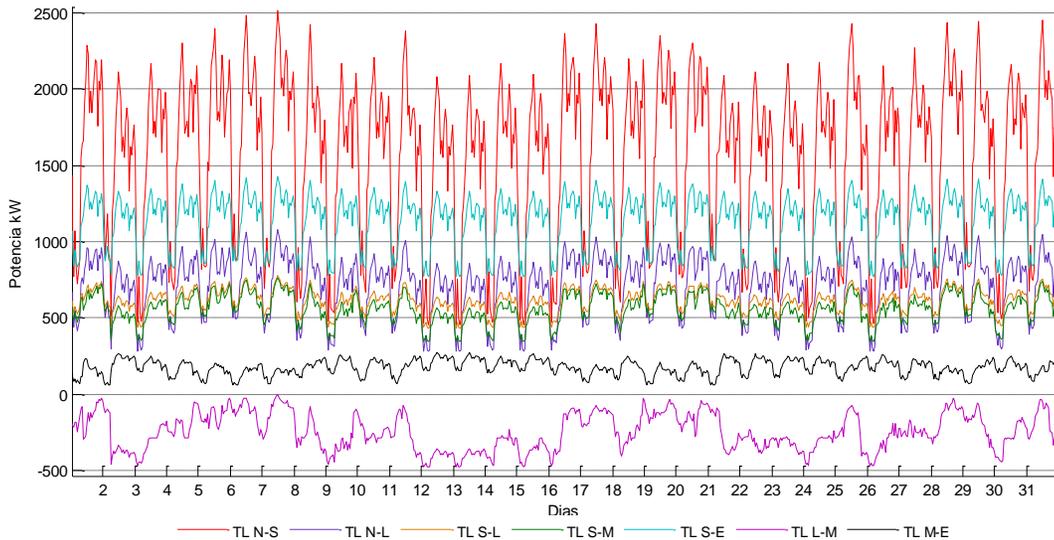
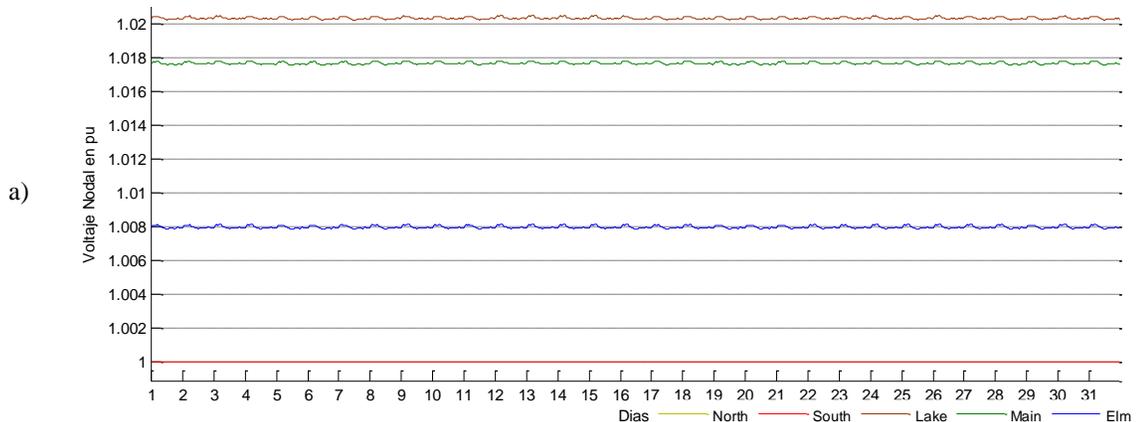


Figura 3. 31 Curvas de potencia activa enviada en las líneas de transmisión para el escenario 2

Una de las respuesta más positiva en este escenario, se muestra en la Figura 3.33, teniendo en cuenta que esta figura presenta las potencias inyectadas por los generadores por fase, donde comparándola con el escenario anterior y el caso de estudio original, presenta un gran incremento en la inyección de potencia por parte del sistema de generación híbrida, lo que motiva que el slack tenga una generación más baja.

Por lo anterior, se puede deducir que la cantidad de potencia vendida a la red pública es mucho mayor a comparación del caso original que fue de MX\$10,101.90 en el mes, por lo que los costos debido a la demanda del nodo Main se van a ver reducidas en gran magnitud. Teniendo en cuenta el precio anteriormente mencionado en el caso de estudio original para el año 2012, para este escenario se calcula una venta mensual de potencia eléctrica a la red pública de aproximadamente MX\$141,854.17, por lo que se observa un gran incremento con respecto a la venta mensual del caso original.



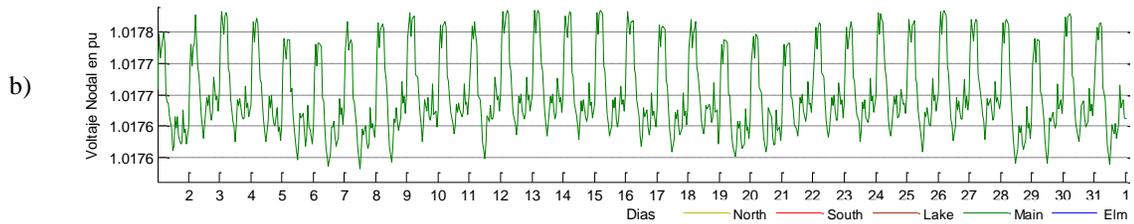


Figura 3. 32 Curvas de magnitudes de voltajes nodales y del nodo Main para el escenario 2

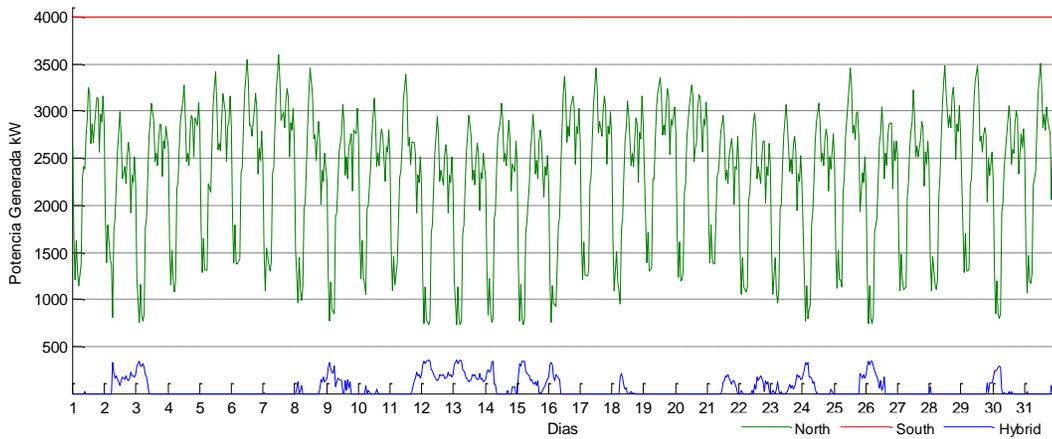
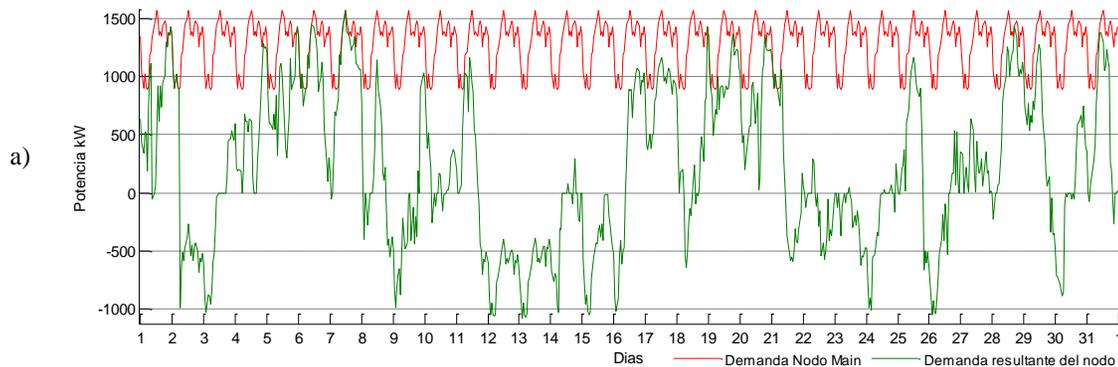


Figura 3. 33 Curvas de potencia activa de los generadores de la red para el escenario 2

En la Figura 3.34a se muestra que la carga del nodo Main es en su mayoría suplida por la generación del sistema híbrido, esta respuesta es representada por la línea inferior sobre cero, así como se observa la gran cantidad de potencia que se envía a la red pública debido a la gran generación por parte del sistema híbrido con respecto a la demanda como se observa por la línea inferior bajo cero de la misma figura y en la Figura 3.34b.

Por lo anteriormente dicho es claro que cuando se tiene una generación local mayor que la carga local existente, tal como se puede observar en la Figura 3.35 se alcanza a llegar a llenar el tanque de almacenamiento de hidrógeno debido a su continua generación, así como gracias a este excedente de generación, la FC ahora juega un papel más protagónico y generará potencia activa de forma más continua a comparación del escenario anterior donde era nulo su funcionamiento y del caso original donde el hidrógeno no alcanza a llegar a su punto máximo de almacenamiento y por lo tanto se ve reducido el uso de la FC.



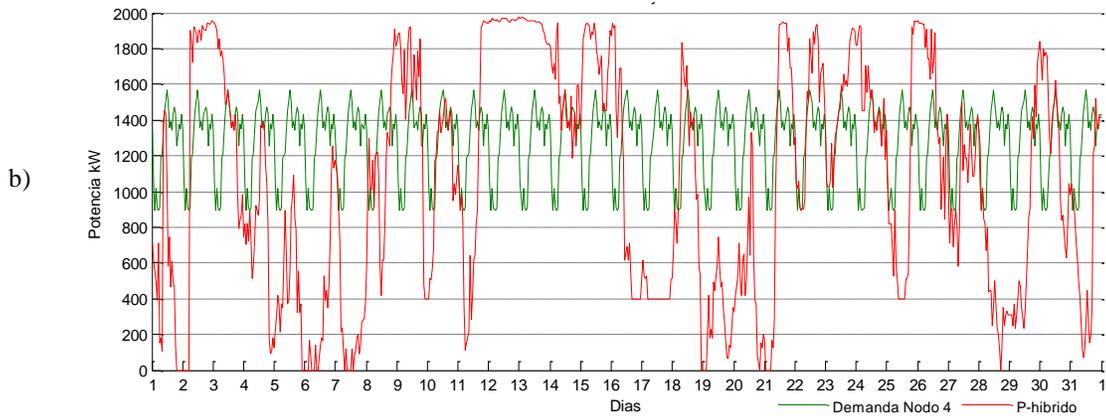


Figura 3. 34 a) Curvas de demanda total del nodo Main demanda resultante del nodo Main b) Curvas de demanda de potencia activa total del nodo Main y potencia activa generada por el sistema híbrido para el escenario 2

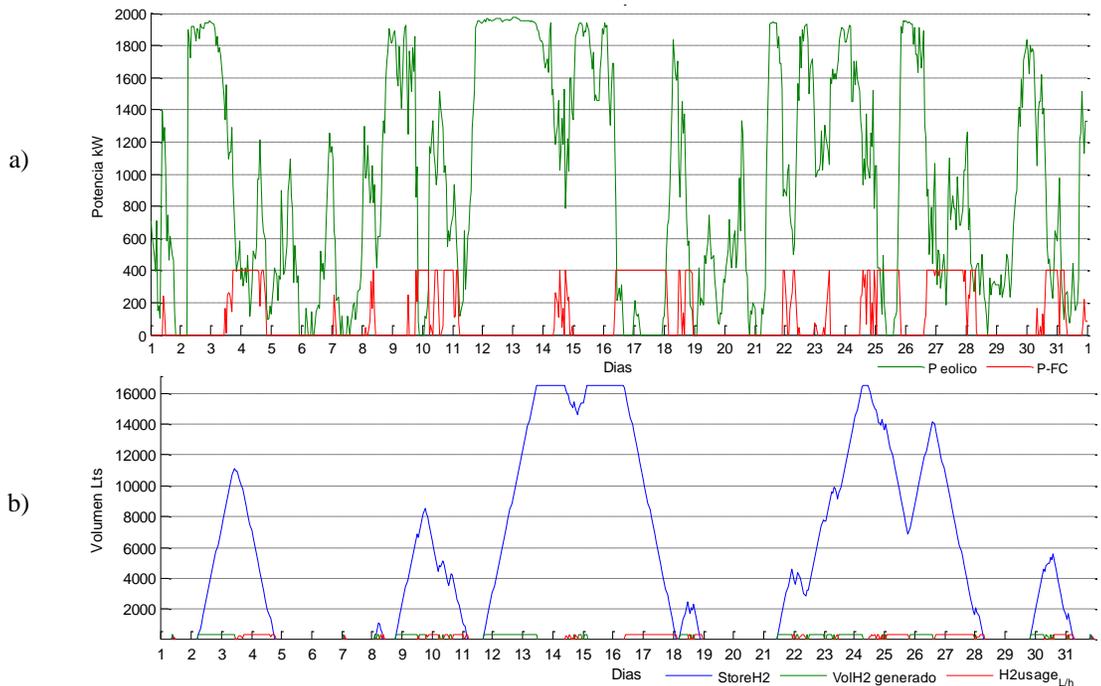


Figura 3. 35 a) Curvas de potencia activa del generador eólico y FC b) Curvas de generación, almacenamiento y gasto de hidrógeno para el escenario 2

A continuación para una mejor comprensión se presentan análisis de flujos de potencia puntuales en los que la demanda máxima coincide con los puntos de generación máxima y mínima del sistema híbrido, así como los casos puntuales en que los puntos mínimos de demanda coinciden con puntos de generación máxima y mínima del sistema híbrido.

Es importante hacer notar en el caso de estudio original, así como en los diferentes escenarios anteriormente expuestos, que aunque existe una cierta limitante de hidrógeno para el funcionamiento de la FC, este puede ser arreglado según la configuración de conexión empleada en el electrolizador, ya que si el electrolizador absorbe la energía requerida, no solo del aerogenerador, sino también de otra fuente, la FC puede presentar un funcionamiento continuo y por tanto el sistema híbrido puede presentar mayor impacto positivo en la red pública.

3.1.3 Análisis de resultados de flujos de potencia en casos puntuales

Los análisis de casos puntuales tienen el propósito de mostrar lo que sucede en la red, más que todo en cuanto a pérdidas en las líneas de transmisión y voltajes nodales, de una forma más detallada en los casos en que el sistema híbrido no está conectado y cuando este se conecta a la red en el nodo Main, datos que son más difícil de analizar en flujos continuos. Para el caso (a) en que el sistema híbrido se encuentra conectado a la red, se presentan 4 casos teniendo en cuenta los máximos y mínimos de demanda y de generación del sistema híbrido y así poder observar mejor la influencia del mismo en la red en casos extremos. Luego se procede a comparar los casos entre sí. Para el caso (b) en que el sistema híbrido no está conectado se presentan 2 casos teniendo en cuenta que la demanda varía, por lo que se toma el punto máximo y mínimo del mismo para analizar.

Para el análisis de casos puntuales (a), se tomaron los casos extremos en que la demanda es máxima con el máximo y mínimo de generación del sistema híbrido y viceversa. Al realizar el análisis de flujos de potencia para estos puntos, se obtienen los resultados de las Figuras 3.36 a la 3.37.

- **Caso 1a** en que la demanda y la generación del sistema híbrido son máximas, es mostrado en la Figura 3.36.

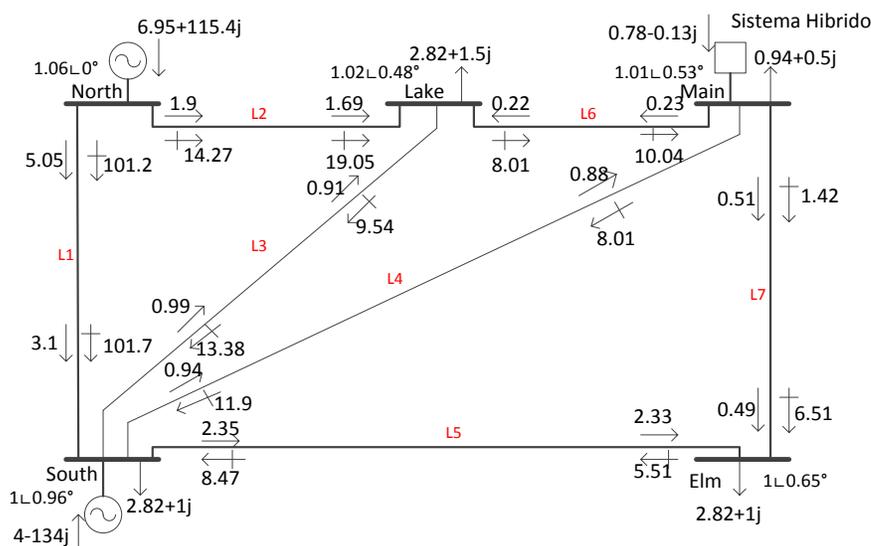


Figura 3. 36Caso 1a: máxima demanda y generación del sistema híbrido

- **Caso 2a** en que la demanda es mínima y la generación del sistema híbrido es máxima señalada en la Figura 3.37.
- **Caso 3a** donde la generación del híbrido y la demanda son mínimas se observa en la Figura 3.38.
- **Caso 4a** donde la demanda es máxima y la generación es mínima se expone en la Figura 3.39.
- **Caso 1b** en que la demanda es máxima sin el sistema híbrido conectado a la red.
- **Caso 2b** en que la demanda es mínima sin el sistema híbrido conectado a la red.

Las Tablas 3.1 y 3.2 muestran los resultados de respuesta de la red de cinco nodos para los casos 1b y 2b, sin tener el sistema híbrido conectado en el caso de estudio original, estos son la base inicial para comparar las implicaciones que tiene el sistema híbrido en la red.

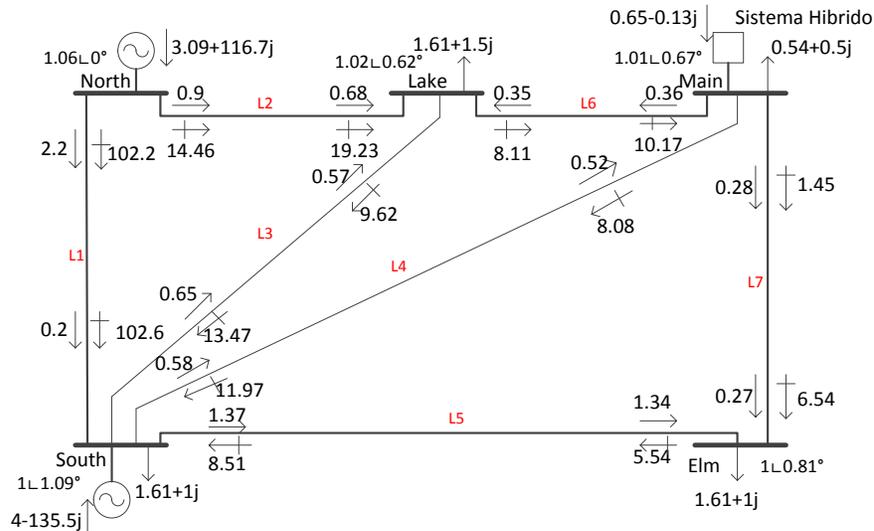


Figura 3. 37 Caso 2a: mínima demanda y máxima generación del sistema híbrido

De igual forma se obtuvieron los datos de las Tablas 3.3 y 3.4 de los casos (a), con las pérdidas de las líneas de transmisión en pu, así como, los valores de voltajes de nodos en pu y sus ángulos respectivamente. Los nombres que se encuentran con letra un poco clara hacen referencia a casos con demanda mínima.

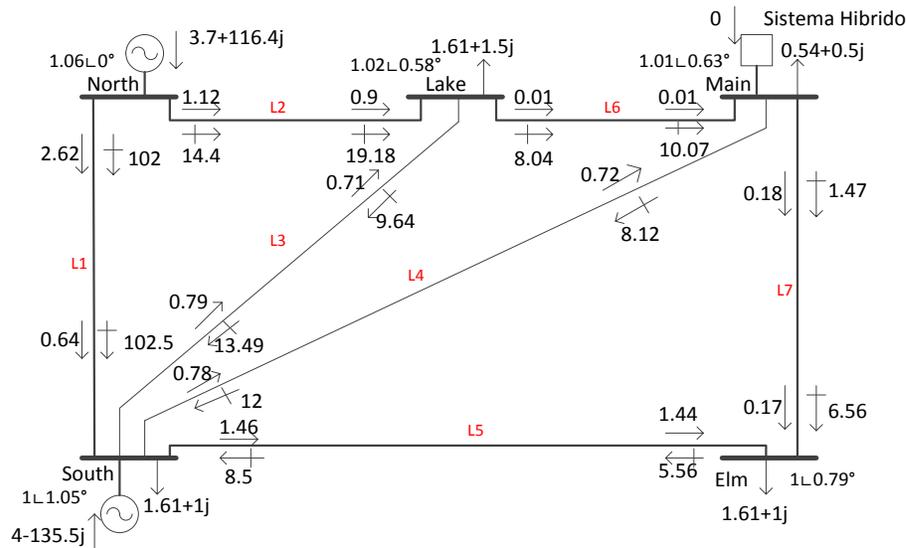


Figura 3. 38 Caso 3a: mínima demanda y generación del sistema híbrido

Al confrontar las Tablas 3.1 y 3.3, se observa que las pérdidas en potencia activa de las líneas de transmisión se ven disminuidas a mayor potencia inyectada en la red por parte del sistema híbrido, como en los casos 1 y 2 donde se observan disminuciones de hasta un 23.2% para el caso 2 con una diferencia de 0.0268 pu con respecto al caso 1b y en el caso 1 donde la demanda es máxima, con una diferencia de 0.0327 siendo aproximadamente una disminución del 13.65% en comparación a los datos

del caso 1a de la Tabla 3.1 para la demanda máxima y mínima. Por otro lado también se observa que para los casos 3 y 4 no existe variación alguna en cuanto a las pérdidas en las líneas debido a que la penetración por parte del sistema híbrido es nula. En cuanto a las pérdidas de potencia reactiva en las líneas de transmisión, estas presentan un aumento en todos los casos de hasta 0.3% aproximadamente.

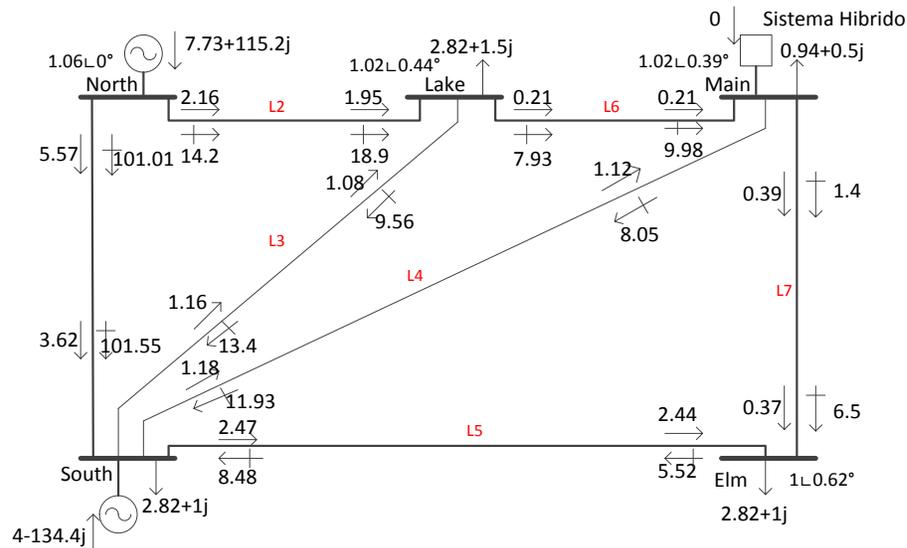


Figura 3. 39 Caso 4a: máxima demanda y mínima generación del sistema híbrido

En la Tabla 3.1 se puede notar como las pérdidas de potencia activa se ven incrementadas conforme la demanda aumenta, comparando las pérdidas totales de los casos 1b y 2b. Teniendo en cuenta que la demanda mínima es de 1.6 MW y la máxima de 2.8 MW se observa que la variación en las pérdidas de potencia de las líneas no es lineal.

Tabla 3. 1 Pérdidas de potencia por línea en pu para los casos puntuales 1b y 2b sin el sistema híbrido conectado

Línea	Casos sin P. Híbrido	
	Caso 1b Demanda Max	Caso 2b Demanda Min
L1	$0.0919 + 2.0257i$	$0.0327 + 2.0454i$
L2	$0.0412 + 0.3320i$	$0.0202 + 0.3358i$
L3	$0.0224 - 0.2296i$	$0.0150 - 0.2313i$
L4	$0.0230 - 0.1998i$	$0.0150 - 0.2012i$
L5	$0.0491 - 0.1401i$	$0.0291 - 0.1409i$
L6	$0.0042 + 0.1792i$	$0.0000 + 0.1812i$
L7	$0.0076 + 0.0796i$	$0.0035 + 0.0803i$
Total	$0.2394 + 1.7483i$	$0.1155 + 2.0693i$

En cuanto a los voltajes nodales se observa que cuando el sistema híbrido está en un punto máximo de generación las magnitudes de los voltajes se mantienen aproximadamente iguales, confrontando las Tablas 3.2 y 3.4, pero en cuanto a los ángulos de voltaje, como era de esperarse, para los casos en que la inyección de potencia por parte del sistema híbrido es nula, los valores se mantienen igual a los de la Tabla 3.2, por otro lado cuando el sistema híbrido presenta un punto de alta generación como el caso 1a, se observa un incremento de 0.02° y solo en el nodo Main de 0.04° siendo que ha este nodo se encuentra conectado el sistema, y para el caso 2a donde se encuentra otro punto de alta generación por

parte del sistema híbrido pero de baja demanda, se observan también incrementos en los ángulos dentro del rango de 0.02 y 0.04, estos incrementos en ambos casos, se deben a que el generador eólico tiene demanda de potencia reactiva, la cual es suplida por la red eléctrica.

Tabla 3. 2 Voltajes nodales de la red de cinco nodos para los casos puntuales 1b y 2b sin el sistema híbrido conectado

<i>Voltaje nodal</i>	<i>Casos de estudio</i>	<i>Nodos de la red</i>				
		<i>North</i>	<i>South</i>	<i>Lake</i>	<i>Main</i>	<i>Elm</i>
Magnitud (pu)	Caso 1b	1.06	1	1.019	1.0172	1.0074
	Caso 2b	1.06	1	1.020	1.0176	1.0079
Angulo (grados)	Caso 1b	0	0.947	0.446	0.4925	0.6207
	Caso 2b	0	1.05	0.5877	0.6377	0.7951

Tabla 3. 3 Pérdidas de potencia por línea en pu para los casos (a) con el sistema híbrido conectado

<i>Línea</i>	<i>Casos con P. Híbrido Máxima</i>		<i>Casos con P. Híbrido Mínima</i>	
	<i>Caso 1a</i>	<i>Caso 2a</i>	<i>Caso 3a</i>	<i>Caso 4a</i>
L1	0.0815 + 2.0291i	0.0241 + 2.0483i	0.0327 + 2.0454i	0.0919 + 2.0257i
L2	0.0358 + 0.3332i	0.0158 + 0.3370i	0.0202 + 0.3358i	0.0412 + 0.3320i
L3	0.0190 - 0.2292i	0.0123 - 0.2309i	0.0150 - 0.2313i	0.0224 - 0.2296i
L4	0.0182 - 0.1991i	0.0111 - 0.2005i	0.0150 - 0.2012i	0.0230 - 0.1998i
L5	0.0467 - 0.1397i	0.0271 - 0.1405i	0.0291 - 0.1409i	0.0491 - 0.1401i
L6	-0.0045 + 0.1808i	-0.0071 + 0.1828i	0.0000 + 0.1812i	0.0042 + 0.1792i
L7	0.0100 + 0.0793i	0.0054 + 0.0800i	0.0035 + 0.0803i	0.0076 + 0.0796i
Total	0.2067 + 2.0544i	0.0887 + 2.0762i	0.1155 + 2.0693i	0.2394 + 2.047i

Tabla 3. 4 Voltajes nodales de la red de cinco nodos para diferentes valores de generación del sistema híbrido para los casos (a)

<i>Voltaje nodal</i>	<i>Casos de estudio</i>	<i>Nodos de la red</i>				
		<i>North</i>	<i>South</i>	<i>Lake</i>	<i>Main</i>	<i>Elm</i>
Magnitud (pu)	Caso 1a	1.06	1	1.019	1.0173	1.0074
	Caso 2a	1.06	1	1.020	1.0176	1.0079
	Caso 3a	1.06	1	1.020	1.0176	1.0079
	Caso 4a	1.06	1	1.019	1.0172	1.0074
Angulo (grados)	Caso 1a	0	0.966	0.4829	0.5366	0.648
	Caso 2a	0	1.07	0.618	0.6743	0.8177
	Caso 3a	0	1.05	0.5877	0.6377	0.7951
	Caso 4a	0	0.947	0.4465	0.4925	0.6207

3.1.4 Discusión de resultados

Teniendo en cuenta los avances tecnológicos asociados a las turbinas eólicas con velocidad variable, la turbina de inducción continua siendo el diseño de mejor elección por su robustez, bajo consumo y diseño simple. El aprovechamiento de la energía eólica avanza tomando ventaja en la economía, y se mueve a lugares remotos para mejorar la forma de vida de comunidades o el aprovechamiento de mejores condiciones del viento. A los diseños de energías renovables se les empieza a buscar formas de mejorar la eficiencia en extracción de dicha energía, pero no solo eólica, sino también de otras fuentes que pueden complementar el sistema eólico, como es el caso del uso del hidrógeno en el presente trabajo.

Debido a que la demanda en el nodo en que se conecta el sistema híbrido se ve reducida, la potencia activa transportada en las líneas de transmisión también se reducen y por tanto las pérdidas en las mismas, los niveles de reducción de pérdidas dependen de los valores de generación del sistema híbrido y la lejanía eléctrica de otros generadores.

El sistema híbrido puede tener no solo una, sino varias celdas de combustible, al igual que electrolizadores, dependiendo de las características que se deseen en la potencia generada por el sistema, así como, la cantidad de penetración que se desee o también según la cantidad de potencia que se le quiera vender a la red pública a la cual se conecta el sistema.

Las simulaciones resultantes del modelo aquí presentado, muestran como la celda de combustible puede jugar un papel poco o muy relevante en la producción de energía eléctrica según la configuración de conexión con la que se haya conectado al sistema híbrido y su dimensión.

Como la celda de combustible ayuda a generar potencia cuando el generador eólico no alcanza a satisfacer la demanda, esto siempre y cuando la celda tenga hidrógeno, se observa como algunas fluctuaciones de potencia se pueden disminuir.

Teniendo en cuenta que en el caso aquí presentado, el sistema eólico-hidrógeno a de compensación de potencia reactiva, dicha potencia se ve incrementada en la red, ya que esta con celda de combustible, se conectó directamente a la red sin tener en cuenta ninguna tecnología suple al generador eólico con la potencia reactiva requerida. Para este caso no se tomó en cuenta ninguna clase de compensación debido a la no tan grande magnitud de potencia reactiva requerida por un solo aerogenerador, caso contrario si fuera el caso de un parque eólico.

La aplicación del modelo del sistema eólico-hidrógeno en diferentes escenarios, no solo los presentados en este trabajo, puede ayudar a ampliar el panorama de aplicaciones de esta y muchas tecnologías, así como configuraciones de conexión entre las mismas para lograr una mejor respuesta.

Muchos avances tecnológicos se han estado llevando a cabo en pro del aprovechamiento de las energías renovables, en el mejoramiento de la eficiencias de las tecnologías ya existentes y en la creación de nuevos sistemas híbridos con combinaciones unas más conocidas que otras, por lo que esto es un tema que no dejara de progresar mejorando los abastecimientos de energía actuales sin comprometer el de las futuras generaciones.

3.2 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ángeles-Camacho C., Bañuelos F., Serrano-García J. y Muciño-Morales D. (2008). *Análisis de metodología usada para la obtención de perfiles de velocidad de viento*. IEEE. RPV-AI/2008 sección México. Ingeniería Investigación y Tecnología.
- [2] Acha E., Fuerte-Esquivel C., Ambriz-Perez H. y Ángeles-Camacho C. (2004). *FACTS: Modeling and Simulation in power Networks*. UK. John Wiley & Sons Ltd. ISBN 0470852712 (pp. 118)

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 CONCLUSIONES

Es de notar que los sistemas de energía renovable están jugando un papel importante en el desarrollo de nuevas formas de generación eléctrica para conexión con la red eléctrica o como sistemas autónomos.

Es importante entender el funcionamiento de cada una de las partes del sistema híbrido, teniendo en cuenta la forma en que pueden interactuar entre ellas y por lo tanto dar un mejor resultado.

La electrólisis es la pieza fundamental para generar el hidrógeno a partir del agua, así como es clave con la que funciona la celda de combustible PEMFC.

El funcionamiento de la celda de combustible hace un más estable y menos intermitente la potencia eléctrica generada por el sistema, ya que sirve como complemento de generación del sistema eólico.

El sistema híbrido reduce las pérdidas de potencia activa en las diferentes líneas de transmisión eléctrica, dado que ayuda a disminuir la carga local en el bus en que fue conectado.

El arreglo aquí modelado, presenta una disminución en costos por la demanda que deja de suplir la red pública al nodo que tiene la conexión con el sistema híbrido y por la posible venta de energía eléctrica a la red pública según la configuración del sistema de generación híbrido.

Se observa un muy leve aumento en el ángulo de voltaje, en los cuatro nodos, sin contar el nodo slack North, esto es reflejado de la variación de la potencia reactiva, esto es también debido a que no se tiene un sistema de compensación conectado con el sistema híbrido, y en dado caso que existiera la necesidad de dicha compensación, la herramienta desarrollada permite su fácil incorporación.

Se comprueba que el modelo es una herramienta importante para el análisis en diferentes redes donde se desee hacer una conexión de un sistema de generación híbrido eólico-hidrógeno con integración de celda de combustible, así como, para observar y establecer parámetros de generación vs demanda, en caso que se quiera tener un cierto porcentaje de inyección por parte del sistema híbrido a la red pública.

4.2 TRABAJOS FUTUROS

Estudio de posibles formas de conexión del electrolizador y la celda de combustible con respecto al aerogenerador y la red eléctrica, para poder establecer la configuración de mayor eficiencia de

generación eléctrica según parámetros preestablecidos como el consumo y generación de cada uno de los elementos.

Siguiendo la posibilidad anterior y teniendo en cuenta que cuando la potencia del sistema híbrido es mucho mayor que la demanda del nodo al que fue conectado, la FC puede ser configurada de modo que ayude a disminuir la intermitencia de la potencia eólica, o se puede configurar para vender energía a ciertas horas del día a la red eléctrica trifásica.

Análisis de mejoramiento en red según los diferentes posibles puntos de conexión del sistema de generación híbrida.

Implementar otras posibles combinaciones de generación híbrida aplicadas a la misma red que incluya el sistema de generación eólico-hidrógeno con implementación de FC para analizar la respuesta y encontrar formas de mejorar la eficiencia de la red.

Analizar nuevas posibles fuentes de generación eléctrica y su impacto en conexión ya sea con la red eléctrica pública o para sustento de una red local (comunidad, edificio...)

Posibles formas de aprovechar los residuos del sistema de generación híbrida aquí planteado tales como el agua por parte de la FC y excesos de oxígeno por parte del electrolizador.

Desarrollar modelos de sistemas híbridos con dos o más fuentes primarias.

SISTEMAS HÍBRIDOS BASADOS EN ENERGÍAS RENOVABLES

A continuación se hace mención y se explica de una forma breve algunos de los sistemas de generación eléctrica basados en energías renovables.

A.1 ENERGÍAS RENOVABLES

A.1.1. Energía Fotovoltaica

Entre las diversas fuentes de energía no convencionales la energía solar parece ser la más antigua de las más grandes promesas de la humanidad. Es gratis, inagotable, no contaminante y libre de políticas de control de polución. La rápida disminución de los combustibles fósiles combinados con la crisis de contaminación y la fuerte subida en los precios del petróleo ha provocado un aumento en el interés de la energía solar.

La energía solar hace referencia a que las radiaciones solares pueden ser convertidas directamente o indirectamente en una forma de energía tal como calor y electricidad. La energía solar eliminaría la mayoría de los problemas ambientales serios asociados con los combustibles fósiles y energía nuclear. La energía es liberada por el Sol como ondas electromagnéticas. La energía solar que alcanza la superficie de la atmosfera de la tierra se compone de alrededor de 8% de radiación ultravioleta, 46% de luz visible y 46% de radiación infrarroja [1].

La medición de radiación, se puede llevar a cabo principalmente por dos tipos de instrumentos:

- Pirheliómetro: Instrumento que mide la radiación solar directa y cuya superficie receptora se dispone normalmente a los rayos solares incidentes. Dispone de un obturador para medir solamente la radiación procedente del Sol y de una región anular del cielo muy próxima al astro.
- Piranómetro: es un instrumento meteorológico utilizado para medir de manera muy precisa la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra. Se trata de un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar (kilovatios por metro cuadrado) en un campo de 180 grados.

La constante solar, es la velocidad a la que la energía solar llega a la parte superior de la atmósfera. Esta es la cantidad de energía recibida en unidad de tiempo en un área perpendicular a la dirección del Sol a una distancia media de la Tierra desde el Sol. La tasa de llegada de la radiación solar varía a lo largo del año.

De acuerdo a la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), la constante solar es de 1,353 kW por metro cuadrado.

Las celdas fotovoltaicas o celdas solares como la de la Figura A.1, convierten directamente la energía solar a energía eléctrica. Estas celdas son hechas de semiconductores que generan electricidad cuando absorben la luz. Las celdas solares hechas de cristal de silicio son comúnmente usadas y su eficiencia teórica es de aproximadamente 24%. Pero las celdas comerciales disponibles tienen una eficiencia aproximadamente de entre 10 a 12%; Arseniuro de Galio es otro material de la celda solar, las celdas de este material pueden alcanzar una eficiencia de entre 20 a 25%. Las celdas solares hechas de arseniuro de galio pueden tener una eficiencia a una temperatura mucho mayor que las celdas hechas de silicio [2].

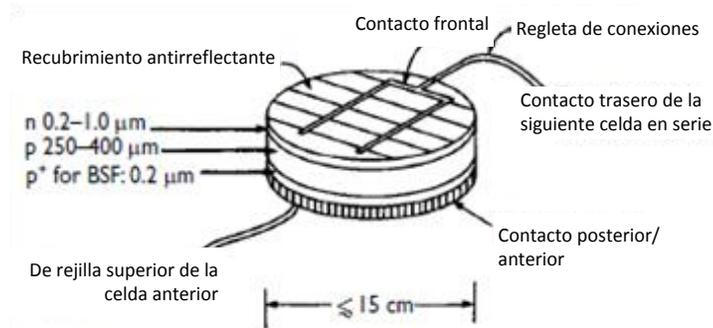


Figura A. 1 Estructura básica de una junta p-n de una celda solar [2].

El origen del potencial fotovoltaico está en la diferencia en el potencial químico, llamado el nivel *Fermi*, de los electrones en los dos materiales aislados. Cuando se unen, la unión se aproxima a un nuevo equilibrio termodinámico. Tal equilibrio puede ser alcanzado solo cuando el nivel *Fermi* es igual en los dos materiales. Este se produce por el flujo de electrones de un material a otro, hasta que una diferencia de voltaje es establecida entre los dos materiales que tienen el potencial justo igual a la diferencia inicial del nivel *Fermi*. Este potencial conduce la fotocorriente [3].

Existen varias ventajas de las celdas solares:

- Necesitan poco mantenimiento.
- Larga vida útil.
- No crean problemas de contaminación.
- La energía es ilimitada
- Fácil de fabricar
- Pueden ser hechos a partir de materias primas que son fácilmente disponibles en grandes cantidades.

Entre las desventajas de las celdas solares se encuentran:

- Comparado con otras fuentes de energía, las celdas solares producen energía eléctrica a un alto costo.

- La salida de la celda solar no es constante y varía según la hora del día y tiempo, pueden ser usadas para generar una pequeña cantidad de energía eléctrica.

Hoy día en México existe una capacidad instalada de 19.4 MW, los miembros mexicanos del comité WEC (*Wind Energy Council*) señalan que más del 70% de la superficie de la república recibe una insolación de más de 17 MJ/m²/day, es decir, aproximadamente 1,700 kWh/m²/año. El ámbito de aplicación para la generación de electricidad solar es ilimitado desde un punto de vista, pero limitada todavía por su alto costo comparado con otras fuentes de energía.

Con respecto a la generación de electricidad, el GEF (*Global Environment Fund*), desde hace algunos años se ha esforzado para financiar una estación CSP (*Concentrated Solar Power*), combinada con una central de ciclo combinado de gas, con el objeto de demostrar las ventajas de la utilización de energía solar para ahorrar en combustibles. El comité de miembros informa que este proyecto no ha superado todavía la etapa de licitación. [4]

A finales del 2008, la capacidad de voltaje fotovoltaico en México fue de aproximadamente 19.4 MW. La tasa de adiciones anuales tiene un promedio de 0.9 MW en años recientes. La electricidad producida por fotovoltaaje en 2008 se reportó de ser de 9.2777 GWh. Los usos principales son: la electrificación rural, comunicaciones, bombeo de agua, refrigeración y conexiones a la red [4].

A.1.2. Biomasa

Es la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía; esa energía la podemos recuperar por combustión directa o transformando la materia orgánica en otros combustibles.

La bioenergía es la mayor fuente mundial de energía renovable, y contribuye un estimado de 10% de la producción de energía primaria a nivel mundial, en particular como fuente directa de calor doméstico e industrial [4].

La biomasa como fuente de energía tiene varias ventajas sobre la disminución del uso de recursos fósiles, siendo que es renovable, ambientalmente limpia, fácilmente adaptable y es producida en la naturaleza a través de la fotosíntesis alcanzada por la conversión de energía solar.

La energía de la biomasa es obtenida por medio de tres formas [1]:

- La biomasa en su masa sólida tradicional (madera y residuos agrícolas).
- La biomasa es quemada directamente para obtener la energía.
- La biomasa en forma no tradicional (convertida en combustibles líquidos).

En este último caso la biomasa es convertida, en etanol y metanol para ser utilizada como combustible líquido en motores. Otra manera es fermentar la biomasa anaeróbicamente para obtener un combustible gaseoso llamado bio-gas [1].

El combustible de la biomasa puede ser producido de la agricultura, forestales o desechos y residuos municipales, también como de cultivos como azúcar, grano y aceite vegetal. Los cultivos crecen para su uso como combustible de biomasa que se puede cultivar en tierras agrícolas degradadas, excedentes y marginales, y las algas podrían, en un futuro, ser explotadas como fuente marina de combustible de biomasa. Así, la biomasa podría proporcionar una porción significantes de demanda de calor, electricidad y combustible en el futuro [4].

A.1.3. Hidroeléctrica

El término de energía hidroeléctrica usualmente se restringe a la generación de potencia debido a la caída de agua. La energía es entonces empleada para propósitos mecánicos directos o, más frecuentemente, para generación de electricidad. Otras fuentes de energía hidráulica son las olas y las mareas.

La hidroeléctrica es por mucho la fuente renovable más establecida y ampliamente usada para la generación eléctrica y la inversión comercial. La primera generación de electricidad se realizó alrededor de 1880 usando hidroturbinas, y la capacidad del total de las instalaciones a nivel mundial ha crecido en torno al 5% por año desde entonces. La energía hidroeléctrica en la actualidad representa alrededor del 20% de la generación eléctrica mundial. La producción depende de las lluvias y el terreno. La Tabla A.1 examina la importancia de la generación hidroeléctrica de varios países y regiones. En alrededor de un tercio de los países del mundo, la energía hidroeléctrica produce más de la mitad del total de electricidad. En general, en los mejores sitios se desarrolló por primera vez a escala nacional, por lo que la tasa de explotación de la capacidad de generación tiende a disminuir con el tiempo. En la década de 1940, la mayoría de los mejores sitios en los países industrializados ya se había explotado [2].

La energía hidroeléctrica es la más flexible y consistente de los recursos de energía renovable, capaz de satisfacer la necesidad eléctrica de la carga base, así como, con la tecnología de acumulación por bombeo, para cubrir los picos de demanda inesperada debido a la escasez o utilización de fuentes de energía intermitentes. Se ha estimado que solo un tercio del total de la capacidad hidroeléctrica mundial ha sido desarrollado, con la mayoría de este desarrollo y crecimiento en Europa.

A finales de 2008, más de 160 países tenían capacidad de recursos de hidroeléctrica, con un total de capacidad de 874 GW a través de 11,000 estaciones hidroeléctricas. Los países líderes en generación fueron China, Canadá, Brasil y Estados Unidos respectivamente, aunque vale la pena señalar que Noruega e India tienen generación hidroeléctrica significativa, particularmente en relación con su tamaño y suministro total de electricidad [5].

La capacidad hidroeléctrica es a menudo categorizada como: *i) Capacidad teórica bruta*, esta capacidad de generación hidroeléctrica posible si todos los flujos de agua natural contienen la mayor cantidad de turbinas como sea posible al 100% de eficiencia; *ii) Capacidad técnicamente explotable*, es la cantidad de capacidad teórica bruta dentro de los límites de la tecnología actual; y *iii) La capacidad explotable económicamente*, que es la capacidad posible dentro de las limitaciones de la actual tecnología y condiciones de económica local. La capacidad instalada a nivel mundial actualmente es de 1.17 TW.

Tabla A. 1 Capacidad hidroeléctrica por país/región [2].

<i>País/Región</i>	<i>Potencial Técnicamente explotable/ TWh/año</i>	<i>Potencial Económicamente Explotable/ TWh/año</i>	<i>Generación Actual/ TWh, 1999</i>	<i>Capacidad Instalada/ GW, 1999</i>	<i>En construcción/ GW, 1999</i>	<i>Fracción Aprovechada D/B/%</i>
África	1890	n/a	73	20	2	4%
Norte América	1690	n/a	710	160	2	42%
Canadá	951	523	340	67	2	36%
USA	530	376	320	80	0	60%
Sur América	2800	n/a	500	106	16	18%
Brasil	1490	810	285	57	11	19%
Asia	4900	n/a	567	174	71	12%
China	1920	1260	204	65	35	11%
India	660	n/a	82	22	15	12%
Japón	136	114	84	27	1	62%
Europa	2700	n/a	735	214	9	27%
Austria	60	56	41	11	0	68%
Noruega	200	180	121	27	0	61%
Rusia	1670	850	160	44	5	10%
Reino Unido	6	1	5	1	0	88%
Medio Oriente	210	n/a	8	4	10	4%
Oceanía	240	n/a	42	13	0	18%
Australia	35	30	17	8	0	49%
Nueva Zelanda	77	40	23	5	0	30%
Global	14400	n/a	2630	692	110	18%

Existen tres tipos de estación hidroeléctrica: *i) de pasada*, donde la electricidad es generada a través de la corriente del río; *ii) deposito*, donde la energía es generada a través de la liberación de agua almacenada (represas); y *iii) acumulación por bombeo*, donde el agua almacenada es reciclada por bombeo hasta un deposito superior para ser liberada de nuevo [5].

En la Figura A.2 se puede observar la capacidad hidroeléctrica instalada por regiones, así como la capacidad hidroeléctrica en los países productores en Millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe).

En México la capacidad de energía hidroeléctrica instalada es de 11.5 GW. México con un potencial hidroeléctrico técnicamente factible, de acuerdo con *Hydropower & Dams Atlas Mundial* de 2009, de 135 TWh/año y una capacidad económicamente explotable de 33 TWh/año, México posee un potencial hidroeléctrico considerable. Los miembros mexicanos del comité WEC informan que la capacidad instalada de hidro a finales de 2008 fue de 11,463 MW, con la generación del 2008 que asciende a 39.2 TWh.

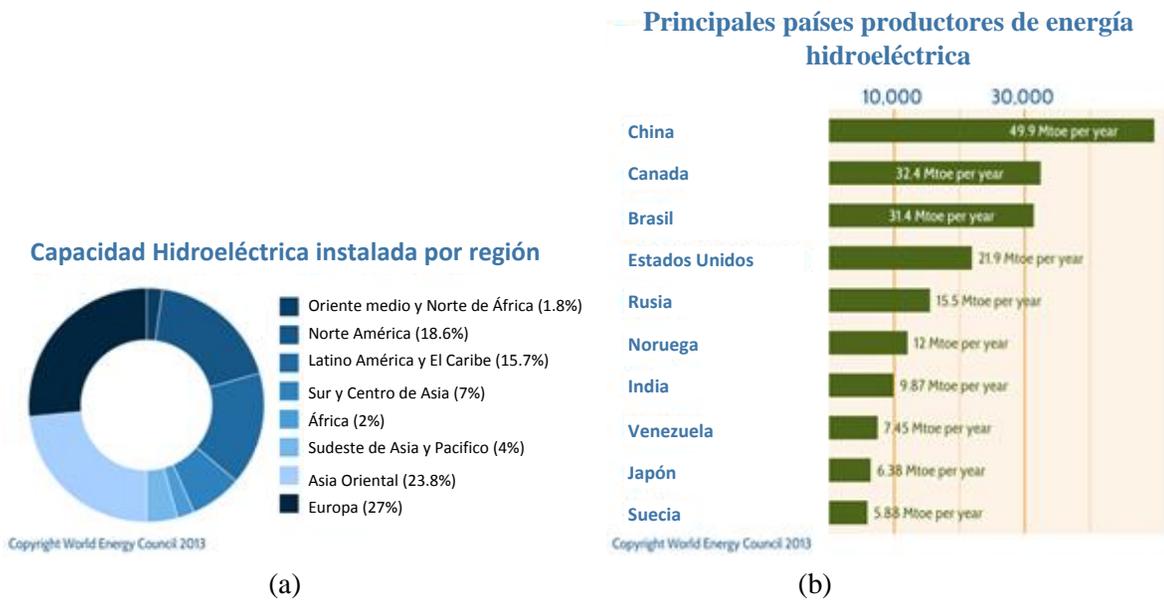


Figura A. 2(a) Capacidad hidroeléctrica instalada por región actualmente, (b) Principales países productores de energía eléctrica [5].

Para el presente estudio, los miembros mexicanos del comité WEC han reportado que La Yesca (750 MW) está bajo construcción por CFE, y que 1,374 MW de capacidad hidroeléctrica esta prevista por CFE para desarrollo futuro. La capacidad de generación en La Villita Michoacán está siendo repotenciada en 400 MW, y en el Infiernillo Guerrero por 200 MW, a través de reformas y programas de aumento de capacidad. El inicio de obra de la construcción de La Parota de CFE (900 MW), proyecto hidroeléctrico en el río Papagayo ha sido retrasado por tres años, con finalización prevista ahora para el 2021. [5]

A.1.4. Energía de las Olas y las Mareas

Los mares y océanos poseen una reserva colosal de energía de elevada densidad (la más alta entre las renovables) asociada al movimiento de las olas. El aprovechamiento de esta energía es un reto para la ingeniería ya que se deben diseñar dispositivos de generación eléctrica robustos, fiables y eficientes que trabajen bajo duras condiciones climatológicas. En los últimos 25 años se han multiplicado los avances en los diseños de dispositivos para el aprovechamiento energético de las olas estando alguno de ellos próximo a la etapa de comercialización. No obstante aún quedan importantes retos tecnológicos que solucionar antes de que la energía de las olas pueda ser aprovechada de forma comercial.

Nuestros mares y océanos son una enorme fuente de energía, que en la actualidad apenas se aprovecha. El potencial energético del mar se manifiesta, fundamentalmente, de cuatro formas distintas: la energía de las mareas, la energía de las corrientes, la energía de las olas y la energía asociada a la diferencia térmica entre las distintas profundidades de los océanos. Entre estas formas de energía marina, la energía de las olas (energía undimotriz) es una de las de mayor interés [6] por el elevado rendimiento potencial de su aprovechamiento, ya que se trata de un recurso de elevada disponibilidad y densidad

energética (el de mayor densidad entre los recursos renovables), es predecible (hasta con dos días de antelación) y está cercana a centros de consumo.

El *oleaje* se entiende desde un punto de vista energético como un derivado terciario de la energía solar. El calentamiento desigual de la atmósfera terrestre genera viento, y el viento en su contacto con la superficie marina transfiere parte de su energía, generando las olas. La cantidad de energía transferida a las olas, y por tanto el tamaño de las mismas, depende de la velocidad del viento, del tiempo durante el cual el viento sopla y la superficie del mar sobre la que sopla. De esta forma valores de energía solar irradiada de 100 W/m^2 aproximadamente pueden ser transformados en valores de potencia por metro de frente de ola comprendidos entre 35 y 60 kW/m. Una de las propiedades características de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias sin apenas pérdida de energía. Por ello, la energía generada en cualquier parte del océano puede acabar en el borde continental para su aprovechamiento. Las zonas de mayor potencial para el aprovechamiento de la energía de las olas son aquellas costas en las que predominan vientos del oeste y poseen extensas líneas costeras, como son la costa oeste de Europa y Estados Unidos, Australia/Nueva Zelanda y Sudáfrica [6].

Estudios acerca del potencial energético del aprovechamiento de las olas a nivel mundial lo estiman en valores comprendidos entre 1-10 TW (aproximadamente un 10% del consumo eléctrico mundial) [7], siendo Europa una de las localizaciones con mayor potencial de aprovechamiento [8] (290 GW en la costa este y 30 GW en la costa mediterránea). Se prevé que la energía de las olas pueda tener 529 MW instaladas en USA para 2020 y casi 100 GW para 2050[9]. Esto supone 1.4 TWh/año para 2020 y más de 260 TWh/año para 2050, lo que representaría entre 0,05% y el 6% de la demanda de electricidad prevista en la UE [10] para 2020 y 2050 respectivamente. España es uno de los países con mayor potencial de energía de las olas, en donde en el archipiélago Canario las estimaciones están en el orden de 20-25 kW/m y en zonas como el Cantábrico, la energía disponible es de 25-60 kW/m [6]. En la actualidad existen en España dos instalaciones piloto instaladas en Santoña (Cantabria, de tipo boya basculante de 40 kW) y Motrico (Vizcaya, de tipo columna oscilante de agua de 480 kW).

La *energía mareomotriz* aprovecha los ascensos y descensos periódicos del nivel del mar, en aproximadamente 24 horas hay dos mareas altas y dos bajas. Estos son llamados mareas semi-diurnas. La subida y bajada del nivel de agua sigue una curva senoidal. La diferencia entre el nivel alto y bajo del agua es llamado rango de la marea. Las mareas se producen debido a la atracción del agua de mar por la luna. Estas mareas se pueden utilizar para producir energía eléctrica. La primera planta mareomotriz a nivel mundial fue comisionada a Ranee en Francia con capacidad de 240MW [1]. La Figura A.3 señala unas formas de generación eléctrica aprovechando la marea y corriente del mar.



Figura A. 3 Formas de generación eléctrica por medio de la energía mareomotriz

Los puntos importantes para la selección de localización de la planta mareomotriz son: el rango de mareas en la localización deseada debe ser adecuada durante todo el año, el sitio seleccionado para la planta mareomotriz debe ser libre de la embestida de las olas del mar, no debe haber ningún cambio apreciable en el patrón de las mareas en el sitio propuesto, y el sitio en el que la planta mareomotriz vaya a ser localizado no debe tener carga excesiva de sedimentos [1].

En México, la única actividad de energía de las ondas ha sido el desarrollo de una energía de las olas del mar, impulsada por una bomba de agua en el instituto de ciencias del mar y limnología de la UNAM, unidad académica Mazatlán [5].

A.2 ALGUNOS SISTEMAS HÍBRIDOS

A.2.1 Sistema híbrido de combinación de calor y potencia (CHP)

Producción combinada de calor y potencia (CHP) es la generación simultánea de calor útil y energía (generalmente electricidad) en un solo proceso. Plantas de cogeneración permiten la recuperación de residuos de calor y/o mejor utilización global de la energía térmica suministrada al sistema. Por consiguiente, pueden ser altamente eficientes energéticamente.

Las unidades de cogeneración se pueden caracterizar por sus prioridades de diseño:

- Uso de calor: El uso de calor sobrante de otro proceso de calentamiento para generar electricidad, como se muestra en la Figura A.4.

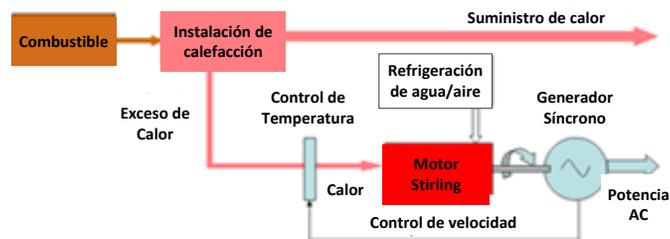


Figura A. 4 CHP usando calor residual para generar electricidad [11]

- Recuperación de calor: haciendo uso del calor residual resultante de la generación eléctrica, Figura A.5.

Unidades a gran escala de cogeneración recuperan el vapor y agua caliente producida en plantas de generación eléctrica convencionales para su posterior uso en procesos industriales o comunidades y calentamiento de espacio.

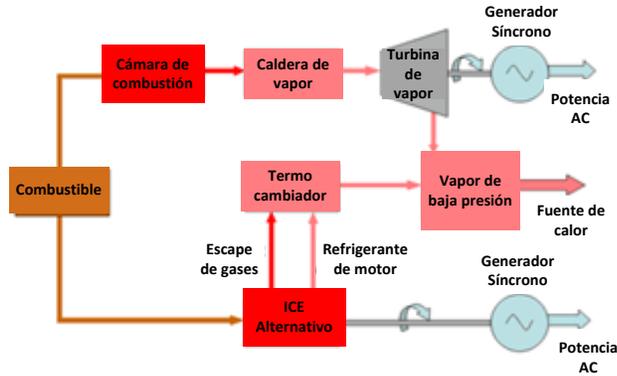


Figura A. 5CHP de recuperación de calor [11]

A.2.2 Eólica – Fotovoltaica

Una planta fotovoltaica en general, tiene la limitación de no producir energía en la noche, para solucionar esta desventaja se utilizan acumuladores o baterías solares. Para las plantas fotovoltaicas aisladas de las redes destinadas al auto-consumo en donde se conoce con exactitud la potencia y el consumo diario, como lo es el caso de las estaciones de comunicación en sitios remotos, es posible dimensionar con bastante precisión una planta fotovoltaica sin apoyo de otros medios de generación. En el caso de los requerimientos energéticos para las viviendas es algo más complicado y es recomendable utilizar otros medios de generación para complementar la energía fotovoltaica [12].

La energía eólica producida por el viento es un complemento no contaminante para una planta fotovoltaica para auto-consumo, así como se muestra en la Figura A.6 (a). La energía eólica también tiene sus desventajas, no siempre tenemos suficiente fuerza del viento para la generación de electricidad, sin embargo se constituye en un excelente complemento de generación para apoyar una planta fotovoltaica.

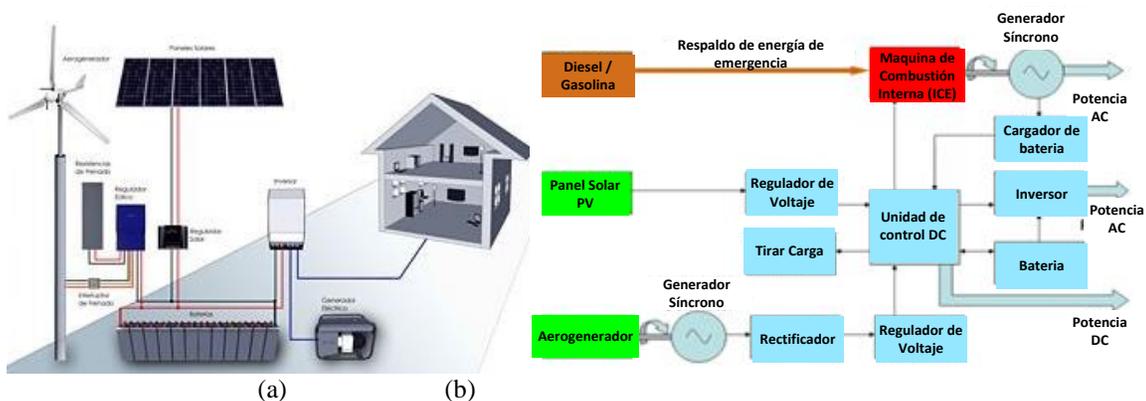


Figura A. 6 (a) Esquema base de un sistema Solar fotovoltaico – eólico (b) Sistema híbrido Eólico-Fotovoltaico – Diésel [11].

Cuando se desea aplicar este sistema híbrido para áreas remotas (RAPS -*Remote Areas Power Systems*), se considera un sistema remoto de generación eléctrica independiente, tiene sentido económico especificar un sistema híbrido con sistemas de potencia solar y eólico en conjunto en vez de una sola fuente de energía. En un sistema independiente a menudo se incorporará un pequeño generador de diésel para suministrar energía a las cargas críticas en caso de emergencia, tal como en la Figura A.6 (b) [11].

A.2.3 Generación Hidro – Eólica

Un aspecto importante de aplicaciones de turbina eólica, especialmente en el entorno ambiental es que esta genera electricidad sin crear contaminación. Además de la generación eléctrica, es muy adecuado para lugares aislados, sin conexión con la red troncal [13].

Sistemas con generación hidroeléctrica pueden utilizar la energía hídrica libremente almacenada en los sistemas de embalses para satisfacer la demanda, evitando así los gastos de combustible de las unidades térmicas.

El sistema híbrido hidro-eólico consiste en tres subsistemas: fuente hidroeléctrica, fuente eólica y cargas. En el caso de este sistema, cuando solo el generador hidroeléctrico está conectado al sistema, entonces suministra energía a toda la carga en función de su capacidad, y si con solo el generador eólico conectado la demanda puede ser cumplida, cuando ambos generadores trabajan de forma conjunta, entonces debido a la conmutación transitoria, fluctúa la generación por unos instantes, pero después de un tiempo, la generación alcanza un estado estable. Siendo que el sistema híbrido genera potencia de acuerdo a su capacidad y satisface la potencia demandada. Si la demanda se incrementa por un instante dentro de la capacidad de la planta, entonces la salida de potencia de los generadores cambian y suministran energía a la carga, de acuerdo a su capacidad de carga compartida. Si la carga aumenta más allá de la capacidad del sistema entonces el generador falla en proveer la potencia requerida a la carga [14].

Un ejemplo aplicado de este sistema híbrido se presenta en El Hierro, una isla española que se abastecerá al 100% con energías renovables, siendo la Figura A.7 el esquema de funcionamiento. Dicho proyecto contempla la construcción de una central hidro-eólica.



Figura A. 7 Esquema de central hidroeléctrica [15]

La isla canaria de El Hierro, Reserva Mundial de la Biosfera desde el año 2001, emerge de las aguas del Atlántico alcanzando rápidamente los 1,500 metros de altitud, lo que da lugar a un paisaje singular de laderas escarpadas permanentemente azotadas por el viento. Tiene una superficie de 278 kilómetros cuadrados y una población de 10,668 habitantes.

El sistema estará compuesto por dos depósitos de agua; uno inferior con capacidad para 225,000 metros cúbicos y otro depósito superior, aprovechando una caldera volcánica natural, con una capacidad para 500,000 metros cúbicos; un parque eólico de 10 MW; una central hidroeléctrica de 10 MW con una caída neta de 682 metros; una central de bombeo; y una central de motores diésel ya existente la cual entraría en funcionamiento en casos excepcionales de emergencia en los que no hubiera ni agua ni viento suficientes para cubrir la demanda.

La demanda eléctrica prevista para el diseño, basada en la planificación energética de Canarias, es de 48 GWh/año en el año 2015; y para el dimensionamiento de la conducción de agua y depósitos, por no ser ampliables, se ha tenido en cuenta la demanda prevista para el 2030.

Con el sistema hidro-eólico, en definitiva, se consigue transformar una fuente de energía intermitente en un suministro controlado y constante de electricidad, maximizando el aprovechamiento de la energía eólica. La mayor parte de la energía vertida a la red de distribución de la isla provendrá de la central hidroeléctrica, utilizándose la mayoría de la energía eólica generada para alimentar el sistema de bombeo y, por tanto, ser almacenada en forma de energía potencial en el depósito superior, lo que garantiza la estabilidad de la red de distribución. El excedente de energía eólica se verterá directamente a la red, sirviendo para la desalación de agua en las dos plantas que tiene El Hierro para ese efecto [15].

A.2.4 Hidroeléctrica – Fotovoltaica

A continuación se explica un sistema híbrido hidroeléctrico-fotovoltaico empleado para una pequeña población rural. En la Figura A.8 se muestra un esquema para sistema híbrido donde el objeto es el diseño de un sistema, factible tecnológicamente, híbrido hidráulico-fotovoltaico, aislado de la red para una pequeña población rural. Este sistema en este caso está dimensionado a partir de un río tipo y recibe el apoyo de un sistema fotovoltaico y un tanque de baterías [16].

Para el diseño de estas instalaciones hay diferentes configuraciones, dependiendo del clima, la situación geográfica etc. Se ha considerado una instalación capaz de generar una base de electricidad mediante una miniturbina y utilizar la energía almacenada en baterías, generada mediante energía solar fotovoltaica, para cubrir o reducir los picos de demanda o cuando por motivos ambientales, como podría ser años más secos o paradas de mantenimiento, no se pueda cubrir el total de la demanda. Las baterías son muy importantes debido a que el sistema está aislado de la red y es esencial que se pueda asegurar la continuidad energética. También se han de utilizar controladores de carga, inversores y rectificadores, según el siguiente esquema [16].

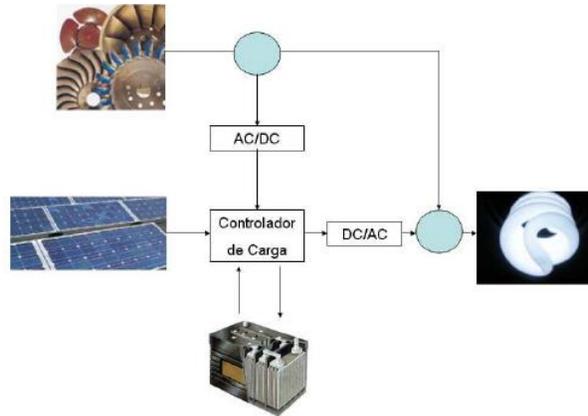


Figura A. 8 Esquema de instalación de sistema híbrido

Para llevar esto a cabo este sistema híbrido se procede de la siguiente forma:

- La energía eléctrica generada por la miniturbina tiene prioridad de consumo respecto a la almacenada en el conjunto de baterías y la generada por los paneles fotovoltaicos.
- La energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos se utiliza principalmente para cargar el conjunto de baterías. En caso que estén cargadas, se utilizara para el consumo de la población, únicamente mientras no se genere suficiente con la miniturbina.
- Si el total de la energía eléctrica generada es mayor que la energía eléctrica consumida se dispone a cargar las baterías. En caso de llenar la batería, la energía eléctrica sobrante se disipa o se desconectan los generadores de las baterías.
- Si el total de la energía eléctrica demandada es superior al de energía eléctrica generada mediante energía hidráulica, se utiliza la energía almacenada en las baterías, o en su defecto la generada por los paneles fotovoltaicos.
- En caso que no se pueda satisfacer la demanda se corta el suministro a algunos consumidores dejando los de prioridad, como pueden ser las neveras y algunas luminarias.
- En caso que no se pueda alimentar a los consumidores de prioridad, se ha de cortar el suministro total y se espera a que algunas de las tecnologías utilizadas puedan generar suficiente electricidad.

La instalación es una central minihidráulica sin azud⁹. Con el cual la captación del agua se realiza en el lecho del río mediante una toma provista de una rejilla y limpia-rejillas móvil para evitar la intrusión y el almacenamiento de elementos ajenos, y es conducida por el canal de derivación hasta la casa de máquinas con un desnivel neto de 12 de metros. En la casa de máquinas se encuentra la turbina de tipo Kaplan de eje horizontal, de una potencia nominal de 360 kW, donde se turbinan el agua del río y se genera la energía eléctrica, acoplando la turbina a un generador síncrono de 324 kW a 690 V [16].

Existen muchas tecnologías renovables para la producción eléctrica, siendo las anteriormente mencionadas las “más reconocidas” pero no más importantes, ya que actualmente se siguen encontrando nuevas formas de generación eléctrica y del aprovechamiento de los recursos naturales.

⁹Azud: Es una construcción habitualmente realizada para elevar el nivel de un caudal o río con el fin de derivar parte de dicho caudal.

A.3 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rahman, S. (2007). *Renewable energy*. Pakistan. University of Engineering & Technology, Lahor. (pp. 6-11, 35-40, 55-75)
- [2] John, T. y Tony, W. (2005). *Renewable energy resources*. USA, Taylor & Francis. Second Edition. (pp. 2-10,106,183, 236-238). ISBN 0419253203
- [3] Patel M. R. (1999). *Wind and solar power systems*. USA, Florida. CRC Press. (pp. 20,24-28, 138-140). ISBN 0849316057
- [4] World Energy. (2013, 3, 27). *Solar in Mexico*. World Energy Council 2013. Recuperado de www.worldenergy.org/data/resources/country/mexico/solar.
- [5] World Energy. (2013, 3, 27) *Energy Resources: hydropower*. World Energy Council 2013. Recuperado de www.worldenergy.org/data/resources/resource/hydropower.
- [6] Navarro R. (2011, 11, 22). *Producción de energía a partir de las olas del mar*. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, CSIC. Recuperado de www.madrimasd.org/informacionIdi/analisis/analisis/analisis.asp?id=50609
- [7] Narayana N. (1976). *Power resources Estimation of Ocean surface Waves*. Elsevier. Ocean Engineering. Vol 3, Issue 6. (pp. 429-439). ISSN 00298018
- [8] Pontes M.T., Athanassoulis G.A., Barstow S., Bertotti L., Cavaleri L., Holmes B., (1998). *Assessing the European Wave Energy Resource*. Transactions of ASME – Journal of offshore Mechanics and artic engineering, Vol 120, Issue 4. (pp. 226-231). ISSN 08927219
- [9] CEREH. Waveplam. (2011, 4, 10). *Energía de las olas – guía para inversores y responsables políticos*. Intelligent Energy Europe. Recuperado de <http://www.waveplam.eu/files/downloads/D.3.2.Spanish.pdf> (pp. 7)
- [10] Baring I., (2013, 3, 16). *Hybrid power systems*. CEERE Center for Energy Efficiency & Renewable Energy. Recuperado de http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2/hybrid_power_systems.html
- [11] Woodbank Communications. (2005, 3, 7). *Hybrid power generation systems*. United Kingdom. Recuperado de http://www.mpoweruk.com/hybrid_power.htm
- [12] Energía Solar Fotovoltaica. (2013, 4, 20). *Independencia de la red eléctrica, plantas híbridas: Auto consumo fotovoltaico*. Planta Fotovoltaica. Recuperado de www.energia-solar-fotovoltaica.info/3_Autoconsumo_Fotovoltaico/10_Independencia_de_la_Red_Electrica_Plantas_Hibridas_Auto_Consumo_Fotovoltaico.html
- [13] Muljadi E. and Mckenna H. (2001). *Power Quality Issues in a Hybrid Power System*. IEEE. Industry Applications IEEE-IAS. Vol. 38, Issue 3. (pp.803-809). ISSN 00939994

- [14] Gagari D., Ramananda P. y Sudip D. (2012). *Hybrid power generation system*. International Journal of Computer and Electrical Engineering (IJCEE), Vol. 4, Issue 2. (pp. 141-144).
- [15] Blogconstrumática. (2011,7, 27). *El Hierro será la primera isla del mundo que se abastecerá al 100% con energías renovables*. Blog Construmatica. Recuperado de <http://blog.construmatica.com/el-hierro-sera-la-primera-isla-del-mundo-que-se-abastecera-al-100-con-energias-renovables/#more-11487>
- [16] Visiga D. (2010). *Memoria: Generación eléctrica mediante un sistema híbrido hidráulico-fotovoltaico aislado de la red para una pequeña población rural*. Universidad de Barcelona y Universidad Politécnica de Catalunya. Masters Universitaris. (pp. 2, 56-59,86-87)

TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una gama de diseños de celdas de combustible utilizando variantes de la química básica, ha sido desarrollada para cumplir diseños o criterios de funcionamiento diferentes, tales como construcciones menos costosas, la utilización de combustible más eficiente, más rápidos arranques o el uso de combustibles más convenientes o menos costosos. Más altas potencias de salida se pueden lograr mediante operación en altas temperaturas, con el uso de catalizadores para acelerar la reacción química de la celda de combustible o por medio de electrodos con un área de superficie mayor. Temperaturas operativas más bajas se pueden conseguir mediante el uso de catalizadores más costosos [1, 2].

B.1 TIPO PEMFC

Siguen el diseño básico. Tienen una buena combinación de eficacia, potencia de salida y funcionamiento a baja temperatura haciéndola la opción para aplicaciones automotrices. Aunque la temperatura de trabajo máxima de la mayoría de los diseños es 100°C para evitar daños a la frágil membrana, algunos productos se han diseñado para funcionar a temperaturas de hasta 120°C.

Reacción de Cátodo: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Reacción de Ánodo: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$

B.2 TIPO AFC

Pilas de combustible alcalinas, utilizan electrolitos acuosos de hidróxido de potasio. Estas fueron algunas de las primeras celdas prácticas y fueron implementadas en el programa espacial Apolo, en la producción de agua potable, así como de energía eléctrica. A pesar de que son baratos en comparación con las celdas PEM, las eficiencias de funcionamiento posibles son de aproximadamente el 60%. Desafortunadamente tienen una salida de baja potencia y el catalizador es propenso a la intoxicación por dióxido de carbono en la atmósfera.

Reacción de Cátodo: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

Reacción de Ánodo: $2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$

B.3 TIPO PAFC

Celda de combustible de electrolito de ácido fosfórico, funciona a una alta temperatura de unos 220°C, entregando alta potencia de 1 MW o más, pero con una eficacia relativamente baja de alrededor del 35%. La consecuencia de la pobre eficiencia de conversión es la alta generación de calor en el contenedor de la celda de combustible. Debido a la alta temperatura de trabajo las pérdidas de eficiencia pueden ser mitigadas mediante el uso del calor residual en la producción combinada de calor y electricidad (CHP).

Reacción de Cátodo: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Reacción de Ánodo: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$

B.4 TIPO MCFC

Las celdas de combustible de carbonato fundido, funcionan aún a más altas temperaturas, de 650°C a 1000°C. Su química única requiere de dióxido de carbono del aire en una parte del proceso. Las eficiencias logradas son del 45% o más y salidas de energía de más de 1 MW, son típicas en aplicaciones de suministro de la red. Debido a su alta temperatura de trabajo pueden operar directamente con los gases de hidrocarburos que se reforman dentro de la celda y no necesitan un suministro de hidrógeno separado. La alta temperatura también significa que menos catalizadores costosos son necesarios, pero el electrolito fundido impone requisitos especiales sobre las medidas de contención y anti-corrosión.

Reacción de Cátodo: $O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-}$

Reacción de Ánodo: $2H_2 + 2CO_3^{2-} \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + 4e^-$

B.5 TIPO SOFC

Las celdas de combustible de óxido sólido, también operan en las mismas o mayor temperatura que las celdas de carbonato fundido con el mismo combustible y ventajas de catalizador. El electrolito cerámico puede funcionar tan caliente como 800°C, tiene la ventaja de que el electrolito se mantiene sólido. Pueden ofrecer potencias de varios megawatts, pero a una eficiencia menor de alrededor del 35%.

Reacción de Cátodo: $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$

Reacción de Ánodo: $2H_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O + 4e^-$

B.6 TIPO DMFC

Las celdas de combustible de metanol directo, son similares a las celdas PEM pero en lugar de hidrógeno puro utilizan combustibles líquidos de hidrocarburos de bajo costo evitando los problemas de suministro de hidrógeno y la exigencia de un reformador local (o a bordo). Trabajan a temperaturas bajas de 50°C a 100°C, sin embargo la potencia de salida es baja, lo que limita sus posibles aplicaciones en equipos electrónicos portátiles.

Reacción de Cátodo: $3O_2 + 12H^+ + 12e^- \rightarrow 6H_2O$

Reacción de Ánodo: $2CH_3OH + 2H_2O \rightarrow 2CO_2 + 12H^+ + 12e^-$

B.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H-Tec education. (2003, 03, 27) *Solar-Hydrogen Energy System*. Luebeck-Germany. Recuperado de <http://www.h-tec.com/fileadmin/content/edu/Lehrmaterialien/Transparencies.pdf> (pp. 6,21,23-24)
- [2] Woodbank Communications. (2005, 3, 7). *Hydrogen fuelled electricity generation*. United Kingdom. Recuperado de http://www.mpoweruk.com/hydrogen_fuel.htm

HOJAS DE DATOS

C.1 AEROGENERADOR GAMESA G80-2.0MW [1]

Rotor		
Diameter	80 m	
Swept area	5,027 m ²	
Rotational speed	9.0 - 19.0 rpm	
Rotational direction	Clock Wise (front view)	
Weight (incl. Hub)	Approx. 38 T	
Top head mass	Approx. 108 T	
Blades		
Number of blades	3	
Length	39 m	
Airfoils	NACA 63.XXX + FFA-W3	
Material	Glass fiber reinforced with epoxy resin	
Total blade weight	6,500 kg	
Tubular Tower		
Modular type	Height	Weight
3 sections	60 m	127 T
3 sections	67 m	145 T
4 sections	78 m	201 T
5 sections	100 m	283 T
Gearbox		
Type	1 planetary stage / 2 parallel stages	
Ratio	1:100.5 (50 Hz) 1:120.5 (60 Hz)	
Cooling	Oil pump with oil cooler	
Oil heater	2.2 kW	
Generator 2.0 MW		
Type	Doubly-fed machine	
Rated power	2.0 MW	
Voltage	690 V ac	
Frequency	50 Hz / 60 Hz	
Protection class	IP 54	
Number of poles	4	
Rotational speed	900:1,900 rpm (rated 1,680 rpm) (50 Hz) 1,080:2,280 rpm (rated 2,016 rpm) (60 Hz)	
Rated Stator Current	1,500 A @ 690 V	
Power factor (standard)	0.98 CAP - 0.96 IND at partial loads and 1 at nominal power.*	
Power factor (optional)	0.95 CAP - 0.95 IND throughout the power range.*	

* Power factor at generator output terminals, at low voltage side before transformer input terminals.

Mechanical design

Drive train with main shaft supported by two spherical bearings that transmit the side loads directly to the frame by means of the bearing housing. This prevents the gearbox from receiving additional loads, reducing malfunctions and facilitating its service.

Brake

Aerodynamic primary brake by means of full-feathering blades. In addition, a hydraulically-activated mechanical disc brake for emergencies is mounted on the gearbox high speed shaft.

Lightning protection

The Gamesa G80-2.0 MW wind turbine generator uses the "total lightning protection" system, in accordance with standard IEC 61024-1. This system conducts the lightning from both sides of the blade tip down to the root joint and from there across the nacelle and tower structure to the grounding system located in the foundations. As a result, the blade and sensitive electrical components are protected from damage.

Control System

The Generator is a doubly fed machine (DFM), whose speed and power is controlled through IGBT converters and PWM (Pulse Width Modulation) electronic control.

Benefits:

- ▶▶ Active and reactive power control.
- ▶▶ Low harmonic content and minimal losses.
- ▶▶ Increased efficiency and production.
- ▶▶ Prolonged working life of the turbine.

Gamesa SCADA System

Gamesa SCADA System and its new generation Gamesa WindNet® (wind farm control systems), developed by Gamesa, that allow realtime operation and remote control of wind turbines, meteorological mast and electrical substation via satellite-terrestrial network. Modular design with control tools for active and reactive energy, noise, shadows and wake effects. TCP/IP architecture with a Web interface.

SMP Predictive Maintenance System

Predictive Maintenance System for the early detection of potential deterioration or malfunctions in the wind turbine's main components.

Benefits:

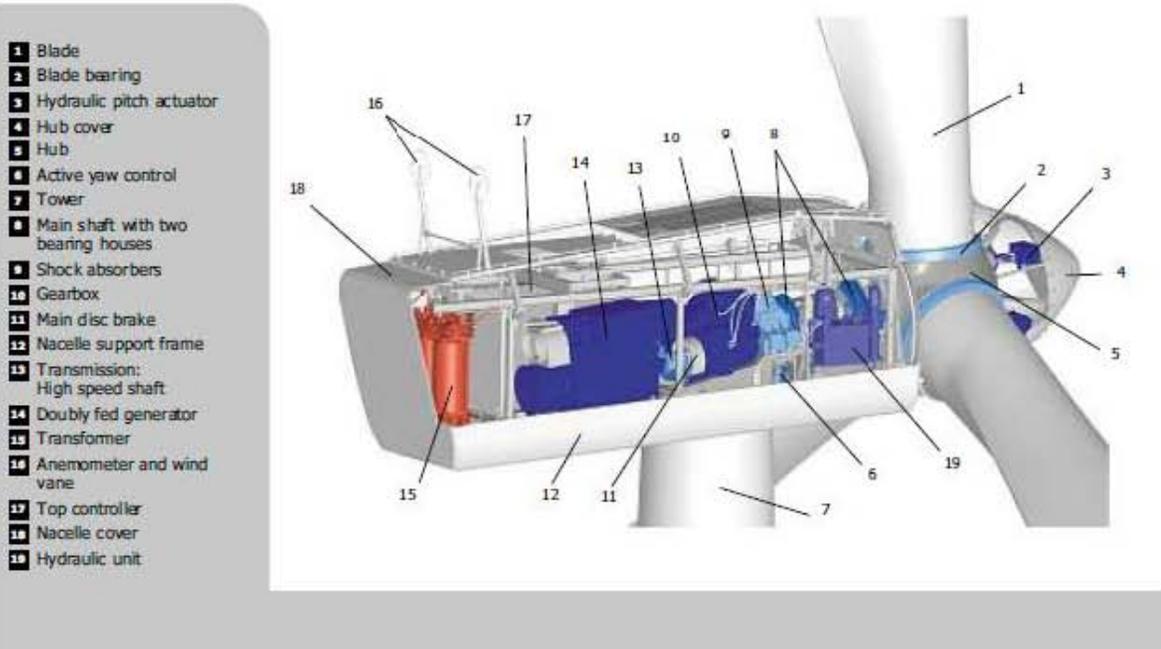
- ▶▶ Reduction in major corrective measures.
- ▶▶ Increase in the machine's availability and working life.
- ▶▶ Preferential terms in negotiations with insurance companies
- ▶▶ Integration within the control system.

Noise control

Aerodynamic blade tip and mechanical component design minimize noise emissions. In addition, Gamesa has developed the Gamesa NRS® noise control system, which permits programming the noise emissions according to criteria such as date, time or wind direction. This achieves the goals of local regulation compliance as well as maximum production.

Grid connection

Gamesa's doubly-fed wind turbines and Active Crowbar and over sized converter technologies ensure the compliance with the most demanding grid connection requirements. Low voltage ride-through capability and dynamic regulation of active and reactive power.

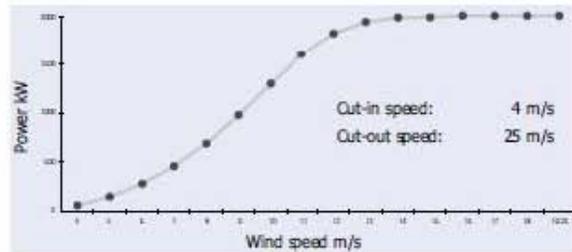


Power Curve Gamesa G80-2.0 MW

(for an air density of 1.225 kg/m³)

Power curve calculation based on NACA 63.XXX and FFA-W3 airfoils.

Calculation parameters: 50 Hz grid frequency; tip angle pitch regulated; 10% turbulence intensity and a variable rotor speed ranging from 9.0 - 19.0 rpm.



SPEED (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19-25
POWER (kW)	66.3	152.0	280.0	457.0	690.0	978.0	1,296.0	1,598.0	1,818.0	1,935.0	1,980.0	1,995.0	1,999.0	2,000.0	2,000.0	2,000.0

C.2 CILINDRO DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO [2]

FUEL CELL APPLICATION
Hydrogen storage tanks for fuel cell application.

INSTRUMENT APPLICATION
High purity storage solutions for gas chromatographs, hydrogen mass, mass spectrometers

CUSTOMIZED PRODUCTION
Customer-designed storage solutions for special applications.

FUEL CELL APPLICATION



FUEL CELL APPLICATION

Products	HB SS 16500
-----------------	--------------------

- [HB-SC-0010-Q](#)
- [HB-SC-0220-Q](#)
- [HB-FR07-0500-B](#)
- [HB-SC-0660-N](#)
- [HB-SS-3300](#)
- [HB-SS-3300-L](#)
- [HB-SS-16500](#)
- [HB-SS-16500-L](#)



that is in addition easy to use and very safe.

The HB-SS-16500 is designed for fuel cells in backup power units and small hybrid or hydrogen cars. With the latest achievements in solid metal hydride technology of AB5-type alloys and unique techniques of alloy loading the HB-SS-16500 is one the most advanced hydrogen storage system. The HB-SS-16500 can safely store hydrogen in the solid state and release it steadily at ambient temperature without additional energy source - an important issue for fuel cell application. The enhanced discharge gas flow rates of the HB-SS-16500 makes it a highly competitive gas supply source for large variety of PEM fuel cells (from 500 W up to 1 KW).

At present, this type of storage is considered as safest one. Even gunshot tests with fully hydrogen charged tanks do not result in any combustible reaction, which clearly demonstrates the safety level of the product. Unlike the high-pressure hydrogen cylinders, here hydrogen is bonded with the alloy chemically. So, it will take hours, before the system will release it fully in event of gas leakage caused by system's damage. The system life cycle is incredibly long – our storage is able to pass few thousand charge/discharge cycles without any essential changes in working technical characteristics.

While charge with only 99.99% purity hydrogen the HB-SS-16500 is capable to provide high purity hydrogen (over 99.9999%). It makes HB-SS-16500 an ideal pure hydrogen source Fuel Cell systems,

Specifications

Parameter	HB-SS-16500	Unit
Hydrogen Storage Capacity	16500 ± 5%	Liter
Raw Hydrogen Purity	≥ 99.99	%
Hydrogen Charge Pressure	4.0 - 5.0 (25°C)	MPa
Charge Environmental Temperature	0 - 35 (we recommend ≤ 25°C)	°C
Hydrogen Discharge Pressure	> 0.1 ≤ 2.0 (25°C)	MPa
Hydrogen Discharge Purity	≥ 99.9999	%
Hydrogen Discharge Flow Rate	≤ 50.0 (25°C)	L/min
Environmental Temperature	5 - 60	°C
Heat Exchange Method	Air Convection / Water Bath	
Valve Type	Swagelok 55316 Needle or Ball valve (1/4" tube fitting)	
Dimension	380L × 550W × 550H	mm
Total Weight	< 190000	g

C.3 ELECTROLIZADOR ZDQ-300 [3]

Technical data sheet of hydrogen generating plant: ZDQ 175-ZDQ 300

Model	ZDQ-175	ZDQ-200	ZDQ-225	ZDQ-250	ZDQ-275	ZDQ-300
H2 Output (Nm3/h)	175	200	225	250	275	300
O2 Output (Nm3/h)	137.5	100	112.5	125	137.5	150
Hydrogen purity (V/V)	≥99.8%					
Oxygen purity (V/V)	≥99.2%					
Working pressure (MPa)	1.5					
Water content in H2(g/Nm3)	≤4					
Alkali content in H2(mg/Nm3)	≤1					
Operation temperature(°C)	85±5					
Rated DC current (A)	6500					
Rated DC Voltage (V)	126	142	162	178	194	214
Cooling water consumption(m3/h)	30	25	30	35	40	45
Power consumption	≤4.5 kwh/m ³ H ₂					
Alkali concentration	25%NaOH or 30%KOH					
Automatic control air pressure	0.5~0.7MPa					
Air consumption	5m ³ /h					
Main power capacity (KVA)	1350	1500	1700	1900	2100	2300
Main power voltage	6KV or 10KV(50Hz)					
Rectifier power supply	0.5KW 380V 50Hz					
Control cabinet power supply	7KVA 380V 50Hz					
Cooling water ten	≤32°C					
Cooling water pressure	0.4~0.6MPa					
Cooling water quality	≤6 German degree					
Room temperature	0~45°C					

Note: 1Nm³/h: 1 m³ per hour in Standard Atmospheric Pressure

C.4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gamesa. (2009). *Gamesa G80-2.0MW*. Gamesa Corporación Tecnológica S.A. (pp. 4-5)
- [2] H-Bank. (2011, 6, 11). *H-Bank Hydrogen Storage Solutions*. H-Bank Technologies Inc. Recuperado de <http://www.hbank.com.tw/fc/16500.html>
- [3] V-FLO. (2009). *Hydrogen Generating Plant by Water Electrolysis*. V-FLO® Group of companies Ltd. (pp. 6)