



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

TESIS

**“LA ENERGÍA EÓLICA COMO GENERADOR DE
ENERGÍA ELÉCTRICA EN COMPLEJO
HABITACIONAL”**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

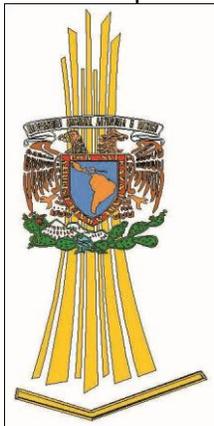
**INGENIERA MECÁNICA ELECTRICISTA
ÁREA: INGENIERÍA ELÉCTRICA
ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

ROSA ISELA VARGAS HERNÁNDEZ

ASESOR:

ING. FRANCISCO RAÚL ORTIZ GONZÁLEZ



SAN JUAN DE ARAGÓN, EDO. DE MÉXICO, 2014.



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.

AGRADEZCO A DIOS.

*A MIS PADRES LUGARDA HERNÁNDEZ Y JUAN VARGAS POR SU AMOR Y APOYO
DURANTE TODA MI VIDA.*

*AL AMOR DE MI VIDA, MI ESPOSO GUILLERMO VÁZQUEZ POR DARMER ANIMOS Y
POR COMPARTIRME SUS CONOCIMIENTOS.*

A MI HIJA ORLI VICTORIA VÁZQUEZ POR DARMER LA ENERGÍA PARA CONTINUAR.

A MI HERMANO JUAN EMMANUEL VARGAS POR SUS CONSEJOS.

*AL ING. RAÚL ORTIZ POR LA PACIENCIA Y RECOMENDACIONES BRINDADOS
DURANTE LA REALIZACIÓN DEL PRESENTE TRABAJO DE TESIS.*

	Pág.
Introducción	I
1. Energías generadoras de electricidad	
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Energías tradicionales.....	5
1.2.1. Carbón.....	6
1.2.2. Hidráulica.....	7
1.2.3. Vapor.....	9
1.2.4. Gas natural.....	11
1.2.5. Petróleo.....	12
1.2.6. Nuclear.....	14
1.2.7. Mareomotriz.....	15
1.2.8. Geotérmica.....	17
1.3. Energías renovables.....	18
1.3.1. Solar.....	22
1.3.2. Biomasa.....	23
1.3.3. Undimotriz.....	25
1.3.4. De las corrientes oceánicas.....	26
1.3.5. Eólica.....	27
2. El viento como fuente energética	
2.1. Generalidades.....	29
2.2. Circulación del viento.....	30
2.2.1. Circulación a escala global.....	31
2.2.2. Fuerza de fricción.....	32
2.2.3. Fuerza de Coriolis.....	32
2.2.4. Fuerza del gradiente de presión.....	33
2.2.5. Cinturones de presión.....	33

2.2.6. Vientos geostróficos.....	34
2.3. Vientos a escala global.....	34
2.3.1. Vientos alisios.....	35
2.3.2. Vientos contralisios.....	35
2.3.3. Vientos circumpolares.....	35
2.4. Circulación a escala regional.....	36
2.4.1. Circulación a pequeña escala.....	36
2.4.1.1. Vientos locales.....	36
2.4.1.2. Brisas costa-mar.....	37
2.4.1.3. Vientos montaña-valle.....	38
2.4.1.4. Orografía del terreno.....	39
2.4.1.5. Cizalladura.....	40
2.4.1.6. Vientos catabáticos y anabáticos.....	41
2.4.1.7. Efecto Föhn.....	42
2.5. Características del viento.....	42
2.5.1. Determinación de velocidad y dirección.....	44
2.5.2. Altura.....	45
2.5.3. Potencia.....	49
2.6. Representación estadística del viento.....	51
3. Aerogeneradores	
3.1. Generalidades.....	55
3.2. Antecedentes.....	56
3.3. Principio de funcionamiento.....	67
3.4. Composición.....	72
3.5. Clasificación.....	79
4. Aplicación de la energía eólica	
4.1. Planteamiento del proyecto.....	81
4.2. Ubicación del sitio.....	81
4.3. Casa habitación.....	82

4.3.1. Cálculos eléctricos.....	83
4.4. Conjunto arquitectónico.....	86
4.4.1. Cálculos eléctricos.....	86
4.5. Selección del aerogenerador.....	87
Conclusiones.....	89
Anexos:	
A. Planos.....	90
B. Artículos de la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica.....	98
C. Artículos de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.....	100
Bibliografía.....	102

El objetivo de realizar el presente trabajo de tesis fue aplicar el uso de energía eólica para la generación de energía eléctrica en la construcción de un complejo habitacional, mediante el uso de un aerogenerador. Aprovechando así las características geográficas predominantes en el este de Oaxaca.

Actualmente existen zonas que debido a su ubicación geográfica aislada, no poseen acceso eléctrico proporcionado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

La generación de energía eléctrica en México, así como su abastecimiento, se ven limitados por el monopolio desarrollado por CFE. Este organismo genera la energía eléctrica, en su mayoría, a través de centrales hidroeléctricas y termoeléctricas, las cuales hacen uso de recursos naturales no renovables como el agua y el petróleo. Sin embargo, existen diversos tipos de energías renovables que pueden ser empleados para generar energía eléctrica, y de esa manera, satisfacer las necesidades de cualquier población.

El llevar a cabo la construcción de un complejo habitacional en una zona geográficamente aislada, puede resultar una situación complicada debido a la carencia de servicios eléctricos y al difícil acceso a éstos.

Bajo estas condiciones se aplicó la energía eólica para la generación de energía eléctrica, y de esa manera suministrar electricidad a un complejo habitacional que se contempló ser construido en una zona desprovista de servicios eléctricos. El diseño se implementó con el empleo de un aerogenerador que permitió generar la potencia suficiente para satisfacer la demanda de consumo del complejo habitacional. Se previó que las condiciones geográficas de la zona fueran adecuadas para el óptimo desempeño del aerogenerador.

La generación de energía eléctrica mediante la aplicación de la energía eólica representa una alternativa para el suministro eléctrico en zonas aisladas geográficamente. En el artículo 3º fracciones I, III y IV de la Ley de servicio Público de la Energía Eléctrica, se menciona la posibilidad de generar energía eléctrica independiente de CFE para fines de autoabastecimiento.

Cabe mencionar que se aprovecha el viento como recurso energético renovable y se diversifican las formas de generación de energía eléctrica (como se menciona en el artículo 4º fracción I de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética), disminuyendo así la sobreexplotación de los recursos no renovables como el agua y el petróleo.

Debido a la necesidad que se tiene actualmente de suministrar de servicios eléctricos a las zonas aisladas geográficamente, se consideró la realización del presente proyecto.

La realización de este proyecto se planteó en la localidad de Santa María Xadani, Juchitán, en el estado de Oaxaca, debido a que dicho lugar reunió los requerimientos para el óptimo desempeño del aerogenerador.

El presente proyecto de tesis consistió en la aplicación del uso de la energía eólica para la generación de energía eléctrica, para el suministro eléctrico de un complejo habitacional.

El diseño del complejo habitacional estuvo integrado de doce casas habitación, éste incluyó el alumbrado exterior y tuvo una demanda de consumo total de 54 kW, que fue cubierta por el aerogenerador Enercon E33.

En el capítulo 1 se mencionan los antecedentes del uso de la energía, así como los recursos que emplean las energías tradicionales y renovables para la generación de energía eléctrica.

El capítulo 2 muestra las generalidades y propiedades físicas del viento, el cual se aborda como un recurso energético.

En el capítulo 3, se mencionan las características generales de los aerogeneradores, como lo son el principio de funcionamiento, su composición y clasificación; al igual que sus antecedentes y evolución a través del tiempo.

El capítulo 4, es la sección donde se expone el planteamiento del proyecto, incluyendo los planos arquitectónicos y eléctricos correspondientes, cuadros de carga y las características del aerogenerador empleado.

**CAPÍTULO 1.
ENERGÍAS GENERADORAS DE
ELECTRICIDAD**

1.1 Antecedentes

A través de su historia evolutiva, el ser humano ha realizado actividades para cubrir sus necesidades; durante la Prehistoria, haciendo uso de su propio esfuerzo y apoyándose de instrumentos y utensilios rudimentarios. Posteriormente se incrementa el rendimiento energético con ayuda de la fuerza animal.

El fuego se convirtió en una herramienta esencial para proporcionar calor, iluminación y la cocción de alimentos (ver figura 1.1). Aproximadamente hasta el año 12 000 antes de Cristo (a.C.) se consigue obtener el fuego a través de fricción.



Figura 1.1 Existieron diversas aplicaciones del fuego durante la Prehistoria. (a) Para la iluminación y calefacción, (b) para la cocción de alimentos y ahuyentar animales peligrosos.

En la Edad Antigua, surgen las grandes civilizaciones: China, Egipto, India y Mesopotamia, cada una de ellas con aportes a la tecnología, derivados de los conocimientos de Física y Mecánica descubiertos en la época.

Durante la Edad Media, comenzó a emplearse la leña para fabricar carbón vegetal con cuyas menas se obtenían metales, éste fue sustituido posteriormente por el carbón mineral en los primeros años de la Revolución Industrial.

De igual manera, se desarrollaron y mejoraron los sistemas de aprovechamiento de la energía disponible en la naturaleza, tales como el agua, el viento y el Sol; entre estos sistemas destacan los molinos de viento y de agua, y el uso de velas de tela en las embarcaciones (ver figura 1.2).

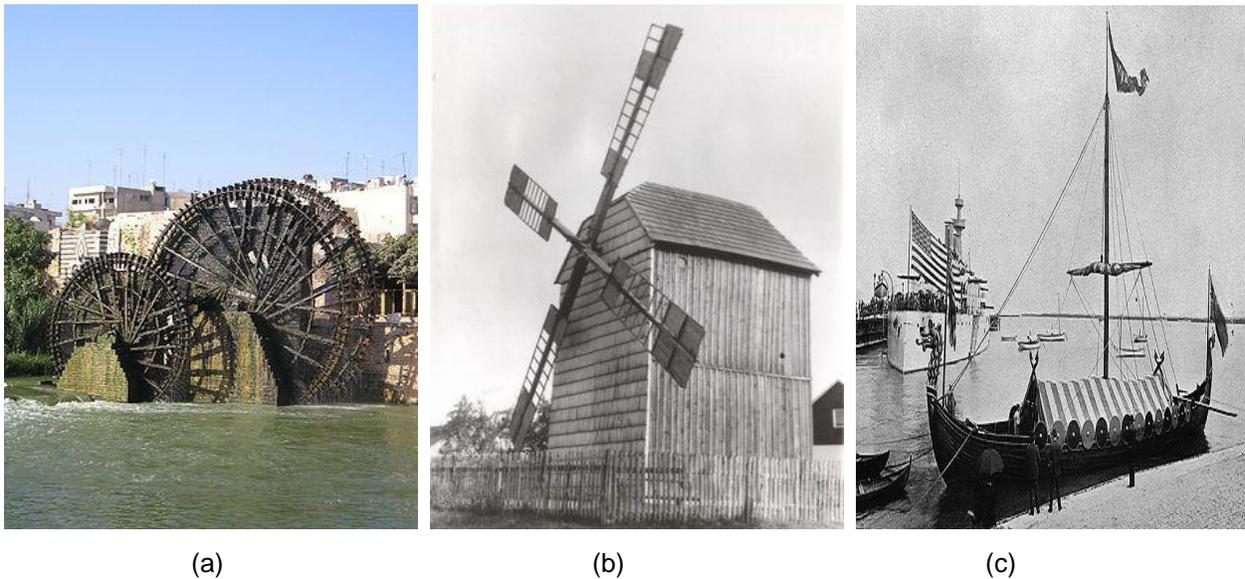
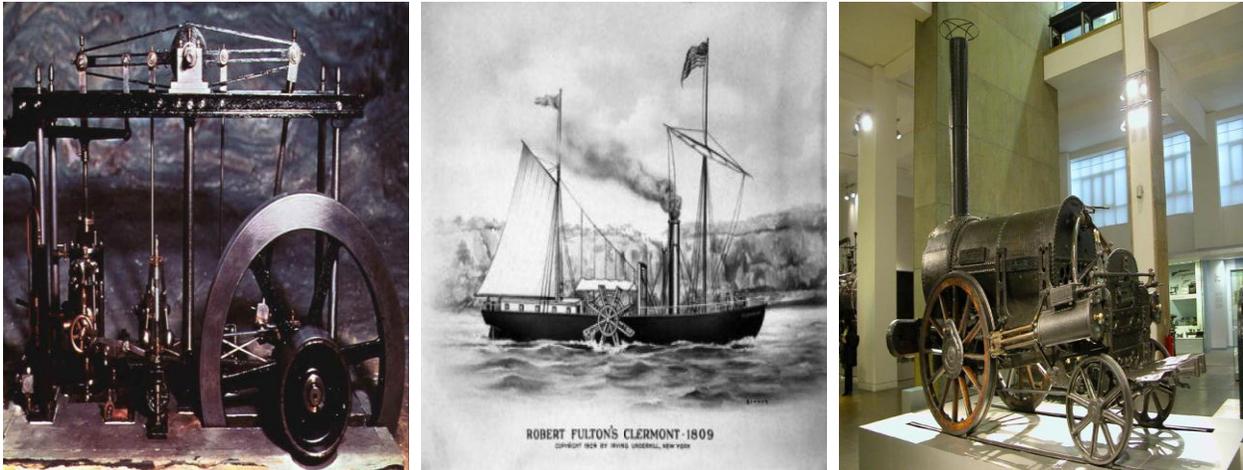


Figura 1.2 Aprovechamiento de las energías disponibles en la naturaleza.

(a) Grandes ruedas hidráulicas de madera desarrollaban una potencia máxima de cincuenta caballos de fuerza, (b) antiguo molino de viento en Moravia, República Checa, data del siglo XVII, (c) barco anglosajón "Sutton Hoo" descubierto por arqueólogos en 1939, se calcula su existencia desde 625 a 637 después de Cristo (d.C.).

Con el aporte de James Watt, la máquina de vapor (1769) y la llegada de la Revolución Industrial comienza el desuso de las formas de aprovechamiento anteriormente mencionadas, por considerarse inestables, por lo tanto, los motores eléctricos y térmicos empiezan a utilizarse más (ver figura 1.3). El auge de este tipo de tecnología no fue controlado ya que aún era escaso el consumo energético y no se tenían problemas ambientales.



(a)

(b)

(c)

Figura 1.3 La máquina de vapor y sus aplicaciones.

(a) La invención de la máquina de vapor es uno de los factores desencadenantes de la Revolución Industrial, al conseguir multiplicar el aporte de fuerza reduciendo el gasto de energía, (b) "Clermont", un barco propulsado por turbinas de vapor en 1807, (c) "Rocket" la máquina de vapor diseñada por George Stephenson en 1829.

En el siglo XIX, el carbón fue desplazado por el petróleo. En 1957, surgió la energía nuclear, lo que permitió la diversificación del sector de las fuentes generadoras de energía eléctrica. A partir de 1970 se comenzaron a utilizar otras fuentes de energía alternativa como son: la fotovoltaica, la solar, la térmica y la geotérmica; lo que representó un avance en el uso de fuentes de energía. En esta misma década, las energías renovables se consideraron de manera opcional a las energías tradicionales (no renovables), debido a su vasta disponibilidad y por su menor impacto ambiental, por esta razón fueron llamadas energías alternativas. Actualmente muchas de estas energías son una realidad, no una alternativa.

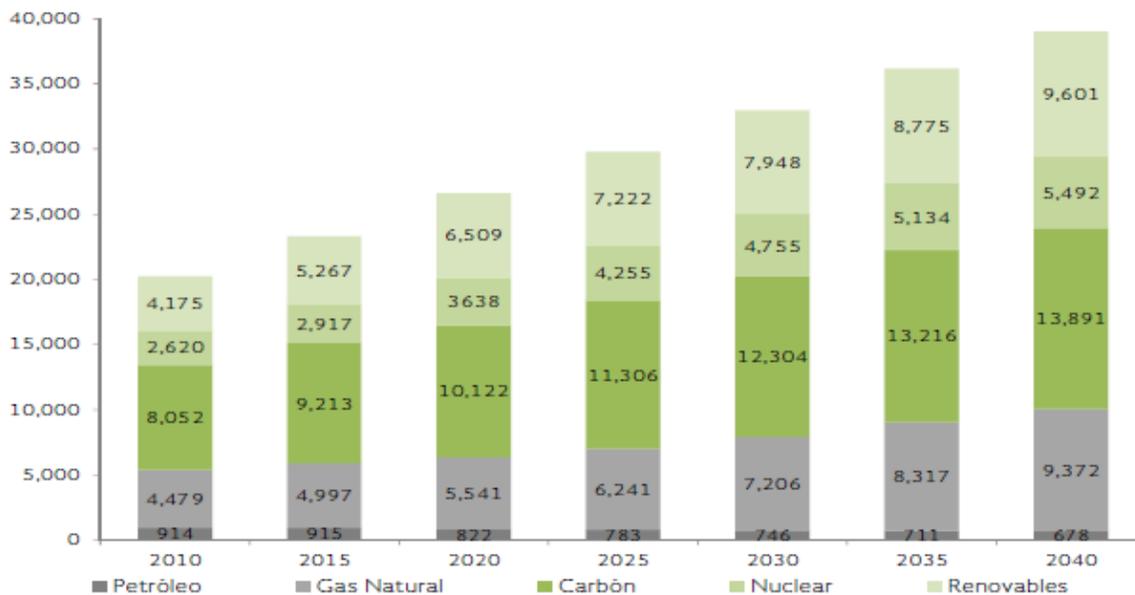
Debido a la dependencia entre la generación de energía eléctrica y el esquema internacional de combustibles fósiles como el carbón y los derivados del petróleo, en la mayoría de los países, estos combustibles representan poco más del 50 % de su fuente primaria de generación. No obstante, se ha incrementado el uso de gas natural y energía nuclear.

Estados Unidos mantiene el primer lugar en la generación de energía eléctrica a nivel mundial,

CAPÍTULO 1. ENERGÍAS GENERADORAS DE ELECTRICIDAD

con 4,353.4 TWh, de los cuales 3,060.1 provienen de combustibles fósiles, seguido de energía nuclear 838.94 TWh, hidroeléctrica 262.3 TW.

Para el caso de México, sólo se cuenta con 271.1 TWh de la generación total, de los cuales se destaca que 217.5 TWh provienen de combustibles fósiles, 37.1 TWh de Hidroeléctricas, 5.9 TWh se obtiene a través de tecnología nuclear. El panorama de los energéticos para la generación eléctrica en el 2010 se caracterizaba en el uso de carbón con 40.9%, seguido por el gas natural con 22.8% y las energías renovables con 21.2%. Sin embargo se espera que para el año 2040 los renovables lleguen a 26.6% de la generación total de electricidad y provoque una disminución en el uso de carbón y de gas natural, manteniéndose siempre a la baja el uso de la energía nuclear y los petrolíferos (ver figura 1.4).



*Figura 1.4 Fuentes de energía para la generación eléctrica mundial, 2010-2040 (TWh).
Fuente: Internacional Energy Outlook 2013. Energy Information Administration, E. U. A.*

Algunos países no poseen o han agotado sus fuentes de energía como lo son el petróleo o el gas y necesitan recursos de otras economías, intentan prescindir de tal dependencia energética.

Las fuentes no renovables de energía como carbón, petróleo y gas sufren actualmente la

CAPÍTULO 1. ENERGÍAS GENERADORAS DE ELECTRICIDAD

disminución de reservas, la alta demanda y la destrucción del medio ambiente. La energía nuclear falla al no tener soluciones para los desechos radiactivos.

En la actualidad menos del 1% del consumo total de energía en el mundo se produce por energía solar o energía eólica. El agua produce por lo menos 2.5% de la energía mundial y 15% de la producción de la energía eléctrica.

En nuestro país, al inicio del 2013, el porcentaje de participación en la capacidad de tecnologías que utilizan fuentes fósiles como combustible fue de 72.6 %, mientras que el ciclo combinado contribuyó con el 34 % de capacidad instalada. A esta tecnología le siguen las plantas termoeléctricas convencionales con un porcentaje de 22.4 % y las restantes con 16.2 % del total de capacidad instalada.

Las tecnologías a partir de fuentes no fósiles representaron el 27.4 % de la capacidad instalada del servicio público, destacando la tecnología hidroeléctrica participando con el 21.7 % del total de capacidad, mientras que las tecnologías geotermoeléctricas, eoloeléctricas, nuclear y solar fotovoltaica sumaron un 5.7%. Ver tabla 1.1.

*Tabla 1.1 Capacidad efectiva del servicio público por tipo de central 2002-2012.
Fuente: Prospectiva del Sector Eléctrico 2013-2027(MW). Secretaría de Energía. México.*

Año	No fósiles					Fósiles					Total	
	Hidro-eléctrica	Geotermo-eléctrica	Eolo-eléctrica	Nuclear	Solar fotovoltaica	Carbón	Termo-eléctrica convencional	Ciclo combinado ¹	Turbogás	Combustión interna		Dual
2002	9,608	843	2	1,365	0	2,600	14,283	7,343	2,890	144	2,100	41,177
2003	9,608	960	2	1,365	0	2,600	14,283	10,604	2,890	143	2,100	44,554
2004	10,530	960	2	1,365	0	2,600	13,983	12,041	2,818	153	2,100	46,552
2005	10,536	960	2	1,365	0	2,600	12,935	13,256	2,599	182	2,100	46,534
2006	10,566	960	2	1,365	0	2,600	12,895	15,590	2,509	182	2,100	48,769
2007	11,343	960	85	1,365	0	2,600	12,865	16,873	2,620	217	2,100	51,029
2008	11,343	965	85	1,365	0	2,600	12,865	16,913	2,653	216	2,100	51,105
2009	11,383	965	85	1,365	0	2,600	12,895	17,572	2,505	216	2,100	51,686
2010	11,503	965	85	1,365	0	3,278	12,876	18,022	2,537	214	2,100	52,945
2011	11,499	887	87	1,365	0	3,278	12,560	18,029	2,495	211	2,100	52,512
2012	11,544	812	598	1,610	1	3,278	11,923	18,029	2,968	252	2,100	53,114
Participación	21.7%	1.5%	1.1%	3.0%	0.0%	6.2%	22.4%	33.9%	5.6%	0.5%	4.0%	100.0%

1.2 Energías tradicionales

Las energías tradicionales también llamadas convencionales, son los recursos energéticos mayormente empleados por el ser humano para la producción de energía eléctrica (figura 1.5).

Entre tales recursos destacan el carbón, el petróleo y sus derivados (gasolina, petróleo diesel 2 y diesel 5) y el gas natural, cuyo origen son los elementos fósiles. Así también las energías hidráulica y nuclear, las que desde su creación no han sufrido cambios significativos a excepción de las mejoras en el rendimiento y eficiencia de las máquinas térmicas y en la automatización de los arranques, la regulación y el apagado de las mismas.



Figura 1.5 El uso de energías tradicionales ha causado severos problemas en el medio ambiente. Una de las causas que afecta al calentamiento global es la emisión de gases tóxicos y agentes contaminantes de las fábricas.

1.2.1 Carbón

Desde la Revolución Industrial, el carbón ha sido considerado como una de las fuentes de energía más importantes. Se trata de un mineral de origen orgánico constituido principalmente por carbono. Se origina debido a la condensación de la materia vegetal descompuesta a través de millones de años.

Se considera dentro de las principales fuentes productoras de energía, aunque el petróleo y el gas natural lo han desplazado de manera progresiva. El lignito, la hulla (o carbón mineral) y la antracita, son los tres tipos básicos existentes.

El lignito carece de carbono y por tanto mal combustible, sin embargo, se utiliza en algunas centrales térmicas.

El carbón mineral es una sustancia sólida, ligera y negra; resultante de la destilación o combustión parcial de la materia orgánica almacenada durante larguísimos periodos de tiempo. Posee un alto contenido en carbono y tiene un alto poder calorífico (ver figura 1.6).



Figura 1.6 Carbón mineral o hulla.

Como mineral combustible, puede ser quemado para producir calor, el que se emplea con propósitos industriales y uso doméstico; además se utiliza en la fabricación de vidrio, cemento, textiles, papel, insecticidas, pinturas, perfumes, explosivos, fertilizantes, gasolina, y en las plantas de producción de energía. Mediante la destilación de sustancias bituminosas adheridas en este tipo de carbón, pueden obtenerse hidrocarburos aromáticos y *coque*, el cual es empleado en la siderurgia. Sin embargo, contiene una elevada cantidad de azufre y por ello es una fuente de contaminación del aire.

La antracita es un carbón levemente contaminante y con gran poder calorífico.

Para la obtención de energía eléctrica mediante carbón, este debe pulverizarse y posteriormente sufrir combustión a través de hornos que calientan depósitos de agua, esta es transformada en vapor; tal vapor es empleado para activar turbinas conectadas a generadores eléctricos. Sin embargo, la mayor parte de la energía contenida en el carbón se pierde en forma de calor. Las turbinas eléctricas más eficientes sólo transforman el 35% de esta energía en electricidad. Según apreciaciones, las centrales eléctricas obtienen 2 kW/h por cada kilogramo de carbón y por cada kW/h se producen 0.915 kg de CO_2 (bióxido de carbono).

Durante los procesos de obtención y uso del carbón, se producen daños ambientales debido a que al quemarlo se liberan elevadas cantidades de gases responsables de efectos nocivos.

1.2.2 Hidráulica

La energía hidráulica se obtiene del movimiento de cuerpos de agua que fluyen desde cierta altura a un nivel inferior, siendo posible su conversión a energía mecánica con el uso turbinas o ruedas hidráulicas, las que conectados a un generador eléctrico, transforman tal energía en electricidad. La cantidad de potencia disponible en una corriente de agua se determina en relación con la diferencia de altura de la caída de dicho fluido y la cantidad de agua que fluye.

Esta fuente energética tiene su origen en el ciclo hidrológico, ya que la energía solar eleva la temperatura de las masas oceánicas, provocando la evaporación y condensación del agua hacia la atmósfera, para posteriormente sufrir una precipitación. El agua que es captada por la tierra forma corrientes de agua, las que debido a condiciones topográficas fluyen de manera subterránea o superficial, tales condiciones influyen en las características de los cauces de los ríos que debido a diferencias de alturas, son conducidas al océano. El agua es nuevamente evaporada, iniciándose otra vez el ciclo.

El aprovechamiento de la energía potencial del agua para la generación de electricidad constituye lo que se denomina energía hidroeléctrica. El conjunto de instalaciones e infraestructura para su aprovechamiento es llamado central hidroeléctrica. Éstas aprovechan, mediante un desnivel, la energía potencial contenida en la masa de agua que transportan los ríos para convertirla en electricidad, utilizando turbinas acopladas. Principalmente se distinguen dos tipos:

- Centrales de agua embalsada: Este tipo de tecnología de aprovechamiento tiene la capacidad de almacenar las aportaciones de un río por medio de un *embalse* (ver figura 1.7 (a)). El embalse es la fuente de abastecimiento de este tipo de tecnología. Esta permite que la planta se mantenga en funcionamiento al suplir constantemente el agua con un caudal regulado.

- Centrales a filo de agua: Son denominadas también centrales de agua fluyente o de pasada. Consisten en la instalación de una *obra de toma*, por la que se recibe una considerable porción del caudal de un río, el que es conducido hacia la central para posteriormente ser devuelto al cauce del río (ver figura 1.7 (b)).



(a)

(b)

Figura 1.7 Aprovechamiento de la energía hidráulica. (a) Central hidroeléctrica de embalse Itaipú, empresa binacional entre Paraguay y Brasil, se ubica en la zona fronteriza del río Paraná. Posee una potencia de generación electrohidráulica instalada de 14 GW, (b) Central hidroeléctrica a filo de agua Los Cipreses, en la Región del Maule, al Sur de Santiago, Chile.

La utilización de energía hidráulica otorga beneficios como: la disponibilidad de un recurso inagotable, la rentabilidad por el bajo costo de producción de electricidad, es una fuente energética limpia (ya que no emite contaminantes), seguridad y fiabilidad. Este recurso es fundamental para la red eléctrica, sin embargo tiene inconvenientes como la contaminación del agua, debido al embalsamiento y la inundación de terrenos o poblaciones.

1.2.3 Vapor

Desde hace algunos miles de años, el agua ha formado parte de la Tierra, ocupando cerca del 75% de la superficie del planeta. Se trata de un elemento imprescindible para la existencia de la vida, debido a sus propiedades físicoquímicas, razón por la cual adquiere gran diversidad de aplicaciones. Una de ellas consiste en la generación de electricidad, esto se realiza a través de su evaporación.

El vapor de agua es incomprensible, lo que ocasiona elevadas presiones. En las centrales termoeléctricas, la energía mecánica necesaria para accionar el rotor de un generador de electricidad, se obtiene a partir del vapor formado al hervir agua dentro de una caldera. El vapor generado posee una elevada presión y se hace llegar a las turbinas para que su expansión sea capaz de mover los álabes de las mismas.

Las centrales termoeléctricas clásicas producen electricidad a través de la combustión del carbón, fuelóleo o gas natural en una caldera (ver figura 1.8), en donde dichos combustibles se emplean para hacer la transformación del agua en vapor. El esquema de funcionamiento de estas centrales es prácticamente igual, independientemente del combustible fósil que se utilice, diferenciándose en el distinto tratamiento de éste, antes de ser inyectado en la caldera y en el diseño de sus quemadores.



Figura 1.8 Central termoeléctrica Castilla, en Chile. Representa la central de generación termoeléctrica de carbón más grande de Sudamérica.

1.2.4 Gas Natural

Dentro de las fuentes de energía tradicionales no renovables, se encuentra el gas natural, el cual está conformado por hidrocarburos livianos, es decir, propano, butano y mayormente metano (CH_4). Se puede encontrar como “gas natural asociado” cuando se acompaña de petróleo, y como “gas natural no asociado” cuando se trata de yacimientos exclusivos de gas natural.

Su formación es parecida a la del petróleo, por lo que se localiza bajo la tierra a profundidades desde 500 m hasta 3 500 m, en las denominadas reservas de gas. Después de la extracción, es sometido a un proceso de separación, en el que se obtienen el gas natural seco (metano y etano que se transporta por gasoductos a los centros de consumo), líquidos de gas natural (propano, butano y pentano, que se transportan por poliductos hasta una planta de fraccionamiento) y otros componentes (agua, azufre e impurezas). El proceso de fraccionamiento consiste en separar los líquidos del gas natural (LGN) en gas licuado de petróleo (GLP) y gasolina natural.

Entre las aplicaciones del gas natural, se encuentra la generación eléctrica y como combustible para la industria, el transporte y el uso doméstico. En las centrales termoeléctricas y de cogeneración eléctrica (ver figura 1.9), el gas natural puede sustituir recursos como el carbón y el fuelóleo. Constituye al combustible más económico para la generación de electricidad debido al rendimiento y la reducción del impacto ambiental. En las plantas de ciclo combinado, la emisión de contaminantes es sensiblemente menor que en la de centrales termoeléctricas clásicas.



Figura 1.9 La planta más grande de cogeneración a gas natural en Portugal, en funcionamiento desde el año 2009.

1.2.5 Petróleo

El petróleo es un recurso natural no renovable que aporta la mayor parte del total de energía que se consume a nivel mundial. Se caracteriza por ser una sustancia oleosa de color oscuro, de origen sedimentario y orgánico, compuesta por hidrógeno y carbono (hidrocarburo).

Es el producto de la descomposición de microorganismos marinos (fitoplancton y zooplancton), así como de materia vegetal y animal acumulados en las capas sedimentarias de la corteza terrestre y en los lechos de los lagos, mares y océanos. Con la unión de rocas y mantos de sedimentos y a través del tiempo, tal sedimentación se transformó en petróleo y gas natural.

Detectado el yacimiento se llevan a cabo los pozos de producción utilizando torres de perforación (ver figura 1.10). Posteriormente el pozo se cubre con una tubería de hierro y sobre su acceso se coloca un sistema de válvulas a donde irán conectados los oleoductos. Éstos últimos atraviesan grandes extensiones de tierra transportando el crudo desde los pozos de producción hasta las terminales de almacenamiento (puntos de embarque o refinerías).



Figura 1.10 Plataforma de PEMEX en las costas de Ciudad del Carmen, Campeche, México.

El petróleo crudo debe someterse a un refinamiento, con la finalidad de transformarlo en gran diversidad de productos. Existen dos procedimientos: *Craqueo catalítico* (se descomponen los hidrocarburos de las fracciones pesadas del petróleo en otras más ligeras) y *destilación fraccionada* (se permite la separación de las distintas fracciones del crudo, sometiéndolo a altas temperaturas y a un proceso de condensación).

La obtención de los distintos derivados depende del grado de ebullición de las fracciones del petróleo. La destilación fraccionada genera productos como lo son el gas combustible, gasolina, nafta, queroseno, diesel, fuelóleo, aceites lubricantes y bitumen.

Este importante recurso ocasiona contaminación por la producción, el transporte y el uso. Se ha alertado sobre los fatales riesgos de la lluvia ácida, el efecto invernadero y los vertidos en los mares.

1.2.6 Nuclear

La energía nuclear es la procedente de reacciones de fusión y fisión de átomos, en las que son liberadas cantidades considerables de energía, las que se utilizan para la generación de electricidad.

El *isótopo 235 del uranio* (U – 235) es sometido a fisión nuclear en los reactores, en donde su núcleo es bombardeado por neutrones, resultando en dos átomos y dos o tres neutrones que inciden sobre átomos de U – 235 cercanos, los que se fragmentan y así sucesivamente.

La gran cantidad de energía liberada en este proceso se utiliza en plantas nucleares en las que se transforma el agua en vapor, con el que se mueve una turbina y se genera energía eléctrica (ver figura 1.11).

El uranio es un mineral, localizado en la naturaleza en porciones limitadas, por lo que se considera un recurso natural no renovable.

La fusión nuclear se lleva a cabo cuando dos núcleos de átomos diferentes se unen, se produce una reacción nuclear, en la que se emiten grandes cantidades de energía. El principal elemento que se utiliza como combustible es el hidrógeno.

La energía nuclear es menos contaminante que los combustibles fósiles. Los riesgos de liberación no controlada de radiactividad pueden ser fatales y producir daños graves.



Figura 1.11 Planta de energía nuclear Susquehanna, Pensilvania, Estados Unidos de América.

1.2.7 Mareomotriz

La energía mareomotriz consiste en la utilización de las mareas. Las mareas representan el movimiento horizontal del agua relacionado con el ascenso y descenso (flujo y reflujo) del nivel del mar, el cual es un efecto producido por la acción de la gravedad de la Luna y el Sol sobre el agua y la Tierra. La amplitud de una marea tiende a variar de acuerdo al litoral marítimo del cual se trate.

El aprovechamiento de la energía mareomotriz consiste en el bloqueo de una bahía o estuario con un dique, con la finalidad de generar una diferencia de nivel a ambos lados, es decir energía potencial acumulada.

La potencia se logra mediante el uso de turbinas con sus respectivos generadores y demás equipo, las cuales se ponen en movimiento al pasar el agua hacia el embalse y posteriormente de este hacia el mar, produciendo de esta manera energía eléctrica. Sin embargo, el uso de este principio de funcionamiento tiene la desventaja de no ser constante, sino depende de los ciclos de las mareas. Por ello hay una secuencia de periodos alternantes de ausencia y generación de energía eléctrica con un periodo igual al de las mareas oceánicas (seis horas), generando incomodidades.

Las tecnologías de aprovechamiento de la energía mareomotriz se basan en lo anterior y son: de simple efecto, de doble efecto (ver figura 1.12), acumulación por bombeo, y de múltiples embalses.



Figura 1.12 Central eléctrica mareomotriz en el estuario del río Rance, Dinan, al noroeste de Francia. Funciona con un ciclo de doble efecto con acumulación por bombeo, posee veinticuatro turbinas de 10MW. Su producción anual de energía es de 550 GW/h (giga watts por hora).

1.2.8 Geotérmica

La geotermia es la energía térmica derivada del calor interno de la Tierra, la cual se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia la superficie a través de roca y fluidos. La energía térmica de la Tierra es originada a partir del magma, que se encuentra acumulado en profundidades de 5 a 10 km, y eleva la temperatura de grandes regiones de roca o reservas confinadas, dando origen a los sistemas geotérmicos. Esta energía se manifiesta en la corteza terrestre de diversas maneras, tales como: manantiales termales, géiseres, fumarolas y volcanes.

El flujo de calor promedio proporcionado a través de la corteza terrestre es de $59m W/m^2$ (miliwatts por metro cuadrado). Cerca del 50% del calor interno de la Tierra es generado principalmente por la desintegración de isótopos radiactivos presentes en la corteza terrestre y el manto, el resto surge por los movimientos diferenciales entre las capas y por la energía térmica liberada hace aproximadamente 4 500 millones de años durante la formación del planeta y que aún fluye a la superficie.

Un sistema geotérmico consiste en la transferencia de energía térmica (mediante un fluido) desde una fuente de calor hasta una hendidura encontrada generalmente en una superficie libre. Una masa de magma de elevada temperatura situada en la corteza terrestre puede proveer el calor necesario para la formación de un sistema geotérmico.

En ciertos sistemas geotérmicos, el gradiente geotérmico supera al gradiente normal cuyo promedio es de $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ó $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ cada 30 metros de profundidad. Bajo estas condiciones, se encuentran fluidos con temperaturas entre $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ a profundidades de aproximadamente 3 km. Los sistemas geotérmicos que presentan fluidos con temperaturas superiores a los $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, se consideran apropiados para la generación geotermoeléctrica, por lo que son óptimos para la perforación de pozos.

Existen tres tecnologías para la generación de electricidad a partir de la explotación de sistemas hidrotermales: plantas geotermoeléctricas de vapor seco, plantas de evaporación súbita o flasheo

de vapor y plantas de ciclo binario (ver figura 1.13).

Las plantas de generación geotermoeléctrica poseen un factor de capacidad superior al de otras tecnologías renovables. Una central geotérmica tiene la capacidad de funcionar durante todo el tiempo, es decir, veinticuatro horas al día y trescientos sesenta y cinco días al año.



Figura 1.13 Planta de generación geotermoeléctrica Los Azufres, Michoacán, México.

1.3 Energías renovables

Las energías renovables son aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía utilizable por la humanidad, y son renovados naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de manera incesante.

La energía en cualquiera de sus formas no puede crearse ni destruirse, sólo puede cambiar de una forma a otra, citando la *primera ley de la termodinámica*¹. Aunque la energía no se pierde, sí se

¹ Si sobre un sistema con determinada energía interna, se realiza un trabajo mediante un proceso, la energía interna del sistema variará.

degrada en un proceso irreversible según la *segunda ley de la termodinámica*². Por lo que la energía no puede considerarse como renovable. Sin embargo, lo que puede renovarse es su fuente.

Las fuentes de energía renovables provienen del flujo de energía que absorbe la Tierra, el cual se origina mediante el Sol y los campos gravitatorios terrestres y lunares.

La distribución desigual de la energía solar sobre la atmósfera influye en el movimiento de masas de aire, fenómeno en el cual reside el origen de los vientos, por tanto, la energía eólica es una forma indirecta de la energía solar, por lo que es considerada renovable.

Otra porción de energía del Sol, penetra en la atmósfera y es absorbida por las plantas, almacenándola en forma de energía química. De esta manera, se concibe la energía de biomasa.

La energía geotérmica incluida en la profundidad de la Tierra tiene su origen remoto en el Sol. Se considera renovable dada su continua disipación, debida a la fricción producida en las rocas internas de la corteza terrestre, que hace que su flujo pueda considerarse inagotable por lo que se estudia como fuente renovable.

Cuando el agua marina recibe la energía solar, es transformada en vapor y elevada a la atmósfera. Posteriormente cae en forma líquida o sólida recolectándose a distintas alturas sobre la Tierra. La energía potencial que poseen las masas de agua situadas a cierta altura se transforma en energía cinética al descender. Tal energía es denominada energía hidráulica.

Actualmente, estas dos últimas fuentes de energía son consideradas energías tradicionales, debido al desarrollo que han alcanzado a través del tiempo. La influencia de las fuerzas gravitatorias de la Luna, el Sol y los vientos, se manifiesta en mareas, gradientes térmicas y olas, y debido a los fenómenos implicados pueden considerarse energía renovable (ver tabla 1.2).

² Todo sistema macroscópico posee una propiedad, la entropía, tal que en todo proceso natural su valor para el universo se incrementa (proceso irreversible) o permanece igual (proceso reversible).

CAPÍTULO 1. ENERGÍAS GENERADORAS DE ELECTRICIDAD

Tabla 1.2 Fuentes renovables de energía.

Fuente de energía renovable	Origen primario de la energía	Nivel de desarrollo de las tecnologías	Aplicaciones
Eólica	Energía del Sol	Nueva	Electricidad
Solar	Energía del Sol	Nueva	Electricidad y calor
Hidráulica	Energía del Sol	Tradicional	Electricidad
Biomasa	Energía del Sol	En proceso de desarrollo	Electricidad, calor, combustibles líquidos
Geotérmica	Calor de la corteza terrestre	Tradicional	Electricidad y calor
Mareomotriz	Movimiento relativo de la Luna y el Sol	Tradicional	Electricidad
(Undimotriz)	Energía del Sol	En proceso de desarrollo	Electricidad
Corrientes oceánicas	Energía del Sol, movimiento relativo de la Luna y el Sol	En proceso de desarrollo	Electricidad

Las energías renovables poseen la capacidad de dar solución a los problemas de cambio climático, proporcionar una diversificación del mercado energético y una oportunidad de colocarse en el mercado de una nueva industria energética (ver figura 1.14).

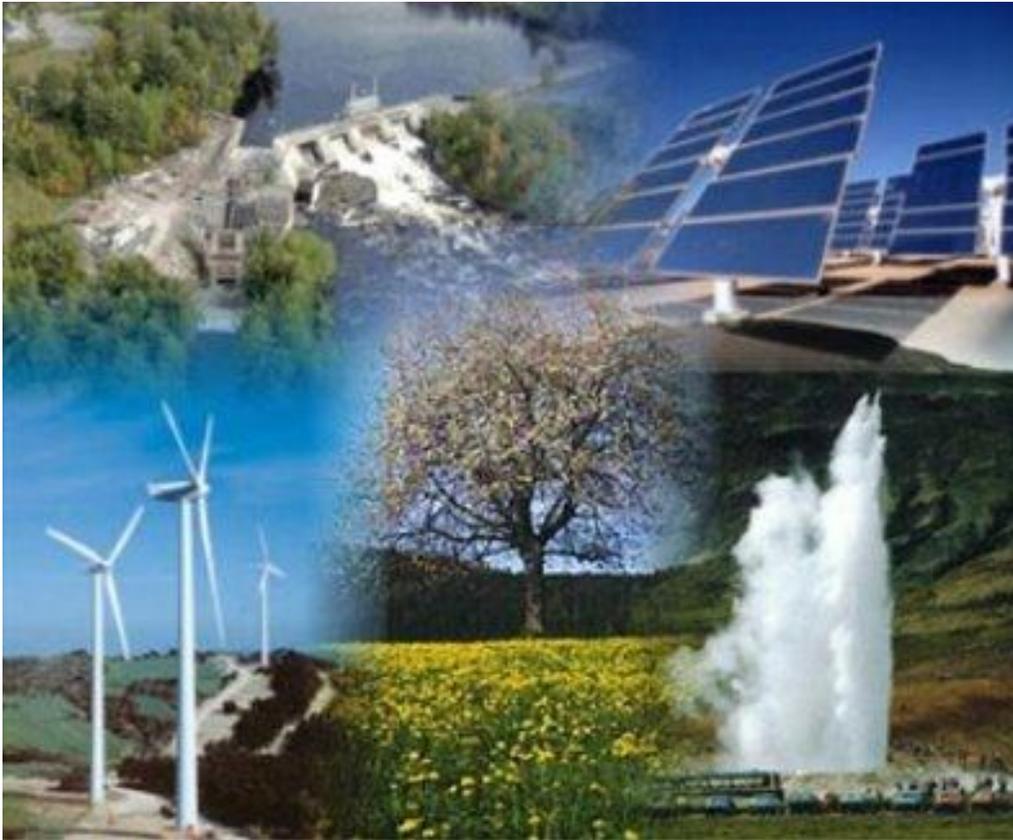


Figura 1.14 Las energías renovables brindan posibilidades de diversificar el mercado energético.

Las energías renovables pueden ser clasificadas por su origen primario, por el nivel de desarrollo de las tecnologías y por las aplicaciones de la energía.

Algunas de las ventajas de las energías renovables son: brindar protección a las fuentes de energía debido a su carácter sustentable, certificar la seguridad y diversidad del suministro energético, proporcionar servicios energéticos de manera virtual y sin impacto ambiental, los costos de los equipos utilizados se reducen continuamente, entre otras.

El uso de las energías renovables representa nuevas fuentes de empleo, aumento en las exportaciones, reactivación de las industrias tradicionales y fortalecimiento científico y técnico.

A pesar del impulso de la eficiencia en el uso de las energías renovables, es inevitable que estas se exploten a largo plazo porque el petróleo seguirá siendo una buena opción para la generación de energía primaria.

Sin embargo, existe la posibilidad real para cambiar combustibles tradicionales por combustibles alternativos, que serán los que desplacen al petróleo y al gas natural.

1.3.1 Solar

La energía solar surge de las reacciones de fusión termonuclear que se llevan a cabo en el Sol; los productos químicos y radioactivos de estas reacciones se absorben en su propio lugar de origen, por lo tanto esta energía se considera limpia.

La energía que es captada por la superficie terrestre puede ser utilizada en forma de energía calorífica, mecánica o eléctrica a través de diversas tecnologías.

Para el aprovechamiento de esta forma de energía es necesario conocer sus principales características, las cuales son: la distribución geográfica, su baja densidad energética y su intermitencia con variaciones diarias, estacionales y debidas a las condiciones atmosféricas prevalecientes. La energía solar admite diversas formas de captación y transformación.

Las células fotovoltaicas transforman la luz solar en energía eléctrica; los colectores absorben calor de manera directa y lo transfieren a otro medio (agua); las centrales helio – térmicas emplean baterías de espejo para agrupar los rayos solares en un colector central, donde se forma el vapor que acciona la turbina, generándose electricidad.

Es decir, según el proceso de captación de la radiación solar, se puede obtener calor y/o electricidad. El calor se adquiere mediante los colectores térmicos y la electricidad, a través de módulos fotovoltaicos (ver figuras 1.15 (a) y 1.15 (b)).



(a)

(b)

*Figura 1.15 Algunos dispositivos para el aprovechamiento de la energía solar.
(a) Sistema de calefacción de agua para uso doméstico, (b) uso de fotoceldas en el alumbrado público.*

1.3.2 Biomasa

La biomasa es un término genérico referido a cualquier producto biológico que posee la capacidad de transformarse en energía útil (con excepción de los combustibles fósiles y sus derivados), tal como la materia orgánica producida en los vegetales mediante la fotosíntesis, proceso en el cual, el agua y el bióxido de carbono son convertidos en materia orgánica y oxígeno, por efecto de la radiación solar.

La materia orgánica resultante contiene un elevado valor energético asociado a su estructura interna y se denomina biomasa vegetal.

El uso de la biomasa es el proceso inverso de la fotosíntesis (los vegetales, algas y algunas bacterias captan la luz y la transforman en energía química).

Las tecnologías más adecuadas para convertir la biomasa en energía, dependen de factores como: el tipo de biomasa, el contenido de humedad, las condiciones del proceso de conversión y el uso

final del producto energético. Estas tecnologías de aprovechamiento energético de la biomasa pueden ser la conversión biológica y la conversión termoquímica.

El conjunto de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que surgen a partir de materia orgánica, se le denomina bioenergía.

Mediante la aplicación de los diferentes procesos de conversión, la biomasa puede ser transformada en formas de energía tales como calor y vapor, biocombustibles y biogás (ver figura 1.16).



Figura 1.16 Central de biomasa forestal Lakeview, ubicada en Oregón, Estados Unidos de América, construida por Iberdrola Renovables. Posee una potencia de 26.8 MW (Mega watts).

Los biocombustibles líquidos son denominados biocarburantes y de acuerdo a sus características físicas y químicas, poseen la capacidad de suplir cantidades significativas de combustibles fósiles en ámbitos como el transporte. Principalmente estos son el bioetanol y el biodiesel.

1.3.3 Undimotriz

La energía undimotriz es la energía generada por el movimiento de las olas del mar. Las olas son producidas por la acción de viento sobre la superficie del océano; la energía contenida en ellas es proporcional a su altura, la cual depende de la intensidad del viento, las condiciones meteorológicas y la distancia durante la cual éste afectó la superficie marina. Al ser originadas, las olas se convierten en un fenómeno independiente del viento. Estas se propagan con pérdidas mínimas de energía hasta su arribo a la costa. Los sistemas para el aprovechamiento de este recurso energético basan su funcionamiento en captar el impulso de la ola, la variación de la altura de la superficie y la variación de la presión bajo la superficie. Se han desarrollado varios sistemas para el aprovechamiento de la energía undimotriz: el convertidor de olas Pelamis (ver figura 1.17), el sistema de efecto Arquímedes, el convertidor de olas Dragon o el absorbedor de punto, por mencionar algunos.



Figura 1.17 El convertidor de olas Pelamis emplea el movimiento del oleaje oceánico para la generación de energía eléctrica.

Aunque no es un recurso desarrollado aún, la energía de las olas es estable y predecible, es renovable y su impacto sobre el entorno es nulo.

1.3.4 De las corrientes oceánicas

Esta fuente energética consiste en el aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes oceánicas, de manera similar a la extracción del viento.

Las corrientes oceánicas desplazan enormes cantidades de agua en el mar, redistribuyen el calor, de manera que influyen en los procesos atmosféricos. Su origen se encuentra en el movimiento de rotación de la Tierra y en su atracción con la Luna y el Sol, lo cual provoca vientos oceánicos en distintas direcciones.

Los efectos de las corrientes oceánicas se amplifican cuando la corriente atraviesa zonas estrechas limitadas por masas de terreno, incrementándose la velocidad.

El proceso de captación se basa en convertidores de energía cinética similares a los aerogeneradores, donde el rotor de la turbina se encuentra montado en una estructura anclada al lecho marino o suspendido en un flotador.

Preferentemente el rotor debe instalarse de manera próxima a la superficie, para aprovechar la zona donde las velocidades del agua son más elevadas. Los rotores que se emplean para llevar a cabo la extracción de energía son los rotores axiales y los rotores de flujo cruzado. La energía disponible depende del diámetro del rotor de la turbina y de la velocidad de las corrientes.

Algunos sistemas para la extracción de este recurso son el Lànstrøm, SeaGen (ver figura 1.18), THAWT y Vivace, entre otros.

La energía de las corrientes oceánicas posee un potencial superior a los 30 GW (Giga watts), por lo que es considerado un recurso energético de gran capacidad.

Entre las ventajas del uso de este aprovechamiento se encuentra la posibilidad de predecir su disponibilidad, así como el impacto medioambiental mínimo o nulo.

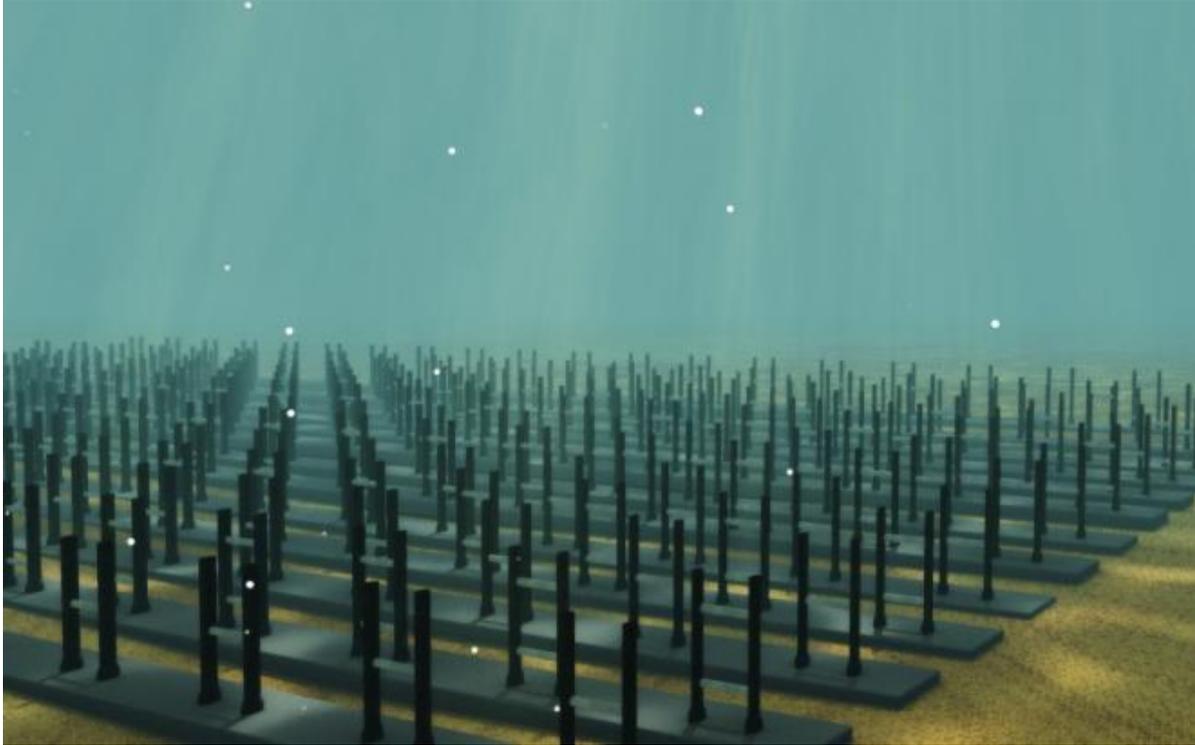


Figura 1.18 El sistema VIVACE (Vortex Induced Vibrations for Aquatic Clean Energy), uno de los primeros dispositivos actuales que es capaz de aprovechar la energía que se genera en la mayor parte de las corrientes acuáticas.

1.3.5 Energía eólica

El viento es el movimiento de las masas de aire, las cuales circulan desde zonas de alta presión atmosférica a zonas de presión atmosférica menor.

Tales diferencias de presión son ocasionadas debido a que la superficie terrestre es calentada por el sol de manera disímil y por el movimiento de rotación de la Tierra. Por ello, la energía cinética del viento es un producto de la energía solar, sin embargo, la energía eólica representa una insignificante porción de la energía que el Sol emite a la Tierra.

La energía del viento representa una fuente energética renovable con alta disponibilidad para su explotación. Durante mucho tiempo, el viento ha sido considerado como una fuente de energía mecánica por lo que la tecnología se ha involucrado en su aprovechamiento. Esta última, se ha tornado cada vez más compleja, incluyendo disciplinas tales como la aerodinámica, la dinámica estructural y la ingeniería eléctrica.

Entre las diversas fuentes renovables, la energía eólica ha destacado como el recurso con mayor viabilidad para la generación de electricidad. El uso de este recurso, demuestra que las energías renovables pueden contribuir a la transformación del modelo energético tradicional (ver figura 1.19).



Figura 1.19 El uso del viento como un recurso para la generación de electricidad. En la imagen, el parque eólico Eurus, con ciento sesenta y siete aerogeneradores para una capacidad instalada de 250 MW, ubicado en Juchitán, Oaxaca, en el Istmo de Tehuantepec, México.

CAPÍTULO 2.
EL VIENTO COMO FUENTE
ENERGÉTICA

2.1 Generalidades

El viento es considerado como toda masa de aire en movimiento (ver figura 2.1), tal fenómeno es provocado por el calentamiento disímil de la superficie de la Tierra. La desigualdad de calentamiento es ocasionada principalmente por la orientación del Sol y los movimientos terrestres.

Se estima que la energía total disponible de los vientos del planeta es aproximadamente el 2% de la energía de la luz solar absorbida por la superficie terrestre que corresponde a 2 000 kW/m² anuales. Este mínimo porcentaje representa cien veces la potencia anual instalada en las plantas de energía de todo el mundo.



Figura 2.1 El viento se encuentra presente en la atmósfera y principalmente en la troposfera, es resultado de fenómenos meteorológicos.

2.2 Circulación del viento

Las regiones tropicales, que reciben los rayos solares casi perpendicularmente, son más cálidas que las regiones polares. En consecuencia, el aire caliente que se encuentra en altitudes más bajas de las regiones tropicales tiende a elevarse y ser reemplazado por una masa de aire más frío en las regiones polares. El desplazamiento de las masas determina la formación de los vientos (ver figura 2.2).

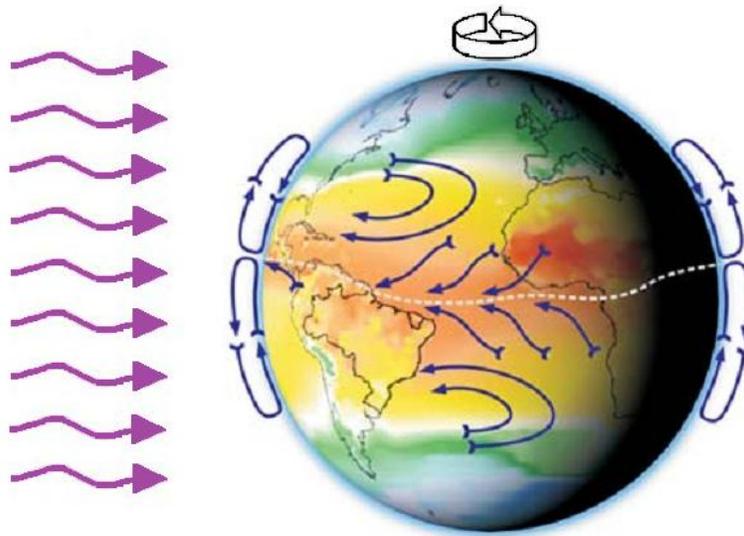


Figura 2.2 Desplazamiento de las masas de aire. La absorción de la energía solar varía respecto a la distribución geográfica, a la hora del día y a la distribución anual. Esto produce un calentamiento desigual y grandes diferencias en la temperatura, densidad y presión, por lo que las fuerzas resultantes moverán las masas de un lugar a otro.

Los vientos circulan a *escala global*, a *escala regional* y a *pequeña escala*, y se ven influidos por fuerzas y diversos aspectos.

2.2.1 Circulación a escala global

La circulación a escala global (ver figura 2.3) es debida a la incidencia de los rayos solares sobre la superficie terrestre y al movimiento de rotación de la Tierra. La zona del Ecuador recibe la máxima radiación solar, mientras que las zonas polares apenas la perciben. En el hemisferio Norte, el movimiento del aire en las capas altas de la atmósfera tiende a desviarse hacia el Este por efecto de la fuerza de Coriolis y en las capas bajas tiende a desviarse hacia el Oeste. En el hemisferio Sur ocurre lo contrario.

Este modelo de circulación se ve afectado por la formación de torbellinos, los cuales son generados en zonas de interrelación de los diferentes ciclos. Al igual también influyen factores como el movimiento de traslación de la Tierra y la presencia de masas continentales y oceánicas, las cuales poseen diferente capacidad calorífica.

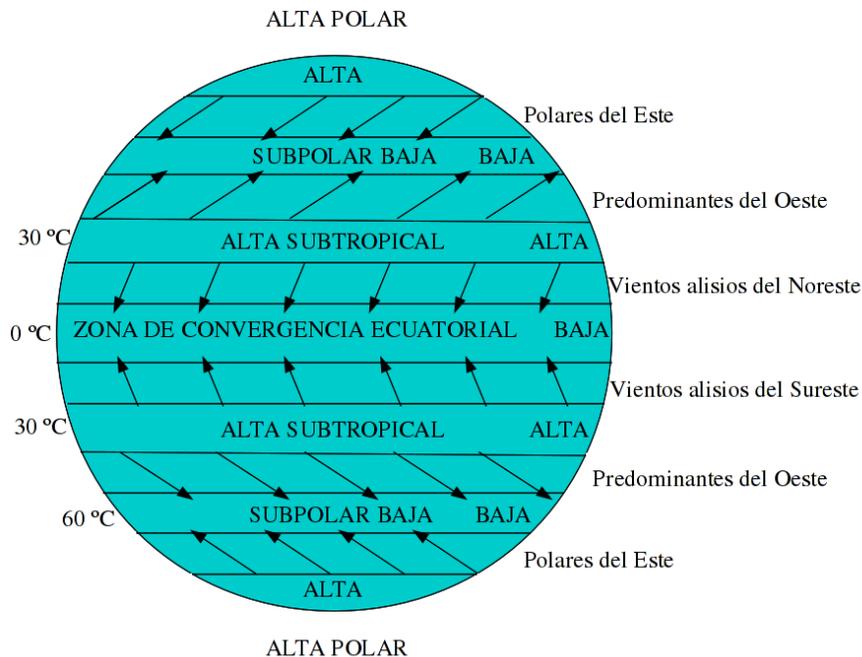


Figura 2.3 Sistema global de los vientos en superficie.

El viento originado sobre la superficie terrestre, es producido a pocos centenares de metros, lo que corresponde a la capa más baja de la atmósfera. Varias fuerzas y fenómenos actúan sobre el viento, entre las fuerzas figura la fuerza de fricción, la fuerza de Coriolis, la fuerza correspondiente al gradiente de presión y fenómenos como son los cinturones de presión y los vientos geostroficados.

2.2.2 Fuerza de fricción

La fuerza de fricción depende de la presión del área (alta o baja), afectando el comportamiento del viento respecto a la altura a la cual circule. Cuanto más cerca circule de la superficie, mayor será el rozamiento, por lo que la velocidad disminuirá y viceversa. Esta fuerza actúa cerca de la superficie de la Tierra a altitudes de 500 m a 1 000 m, sección conocida como capa límite atmosférica. Encima de tal capa, la fricción no influye en el viento, por lo que la aceleración de éste es nula y la velocidad constante, provocando un equilibrio entre la fuerza de Coriolis y la fuerza del gradiente de presión.

2.2.3 Fuerza de Coriolis

Las fuerzas de Coriolis son producidas por la rotación que desvía las masas de aire hacia la derecha en el Hemisferio Norte y a la izquierda en el Hemisferio Sur. Coriolis, un matemático francés observó que un objeto de masa m que se desplaza con una velocidad angular constante ω , experimenta una velocidad tangencial (velocidad angular * radio de giro), la que se incrementa conforme se aleja del centro.

Si el objeto se va alejando gradualmente del centro, la variación de su velocidad implicará una aceleración, la que a su vez es debida a la existencia de una fuerza sobre la masa del objeto. Estas son respectivamente la aceleración y la fuerza de Coriolis, las cuales son perpendiculares al desplazamiento del objeto. La expresión de ésta fuerza está dada por la ecuación 2.1.

$$F = -2 \Omega \sin \varphi \dots (2.1)$$

Donde:

Ω = velocidad angular de la Tierra

φ = *latitud*

V = *velocidad*

Esta fuerza se incrementa a medida que aumenta la velocidad del viento, permanece en ángulos rectos en relación con la dirección del viento y crece con la latitud, siendo mayor en los polos ($\text{sen } \varphi = 1$) y nula ($\text{sen } \varphi = 0$) en el Ecuador.

2.2.4 Fuerza del gradiente de presión

La fuerza del gradiente de presión. La presión atmosférica es la fuerza que ejerce la atmósfera en un punto específico de la Tierra, como consecuencia de la acción de gravedad sobre la columna de aire que se encuentra encima de ese punto. La presión del aire sobre la superficie terrestre es diferente en distintos lugares y se debe a la diferente cantidad que reciben. Cuando el aire se eleva, el área de baja presión permanece en las capas inferiores porque al ascender ya no presiona sobre la superficie formando áreas de alta presión. La diferencia de presiones hace que el aire se mueva desde las zonas de presión más alta a las de más baja. Este movimiento es el que genera el viento. La fuerza del gradiente de presión se define como:

$$F_p = \left(-\frac{1}{\rho}\right) \left(\frac{\phi\eta}{\phi n}\right) \dots (2.2)$$

Donde:

ρ = *densidad del aire*

$\frac{\phi\eta}{\phi n}$ = *gradiente de presión*

2.2.5 Cinturones de presión

Los cinturones de presión son zonas de presiones bajas entre 60° N y 60°S, zonas de presiones

altas entre 30°N y 30°S y el cinturón ecuatorial de bajas presiones. Son formados debido al calentamiento de la zona ecuatorial, donde el aire asciende, se enfría y descendería en el Polo Norte si no fuera por la fuerza de Coriolis. Debido a esto, el aire desciende hacia el paralelo 30°. De forma análoga, en los polos el aire frío desciende, recoge calor y asciende nuevamente hacia el paralelo 60°. Estos cinturones son influenciados por los vientos y el movimiento de rotación de la Tierra. Tales cinturones combinados con la fuerza de Coriolis, establecen la disposición de las corrientes en las zonas mundiales de altas y bajas presiones (vientos alisios y vientos del oeste).

2.2.6 Vientos geostróficos

Los vientos geostróficos son una serie de isóbaras rectilíneas situadas en el hemisferio norte generan un viento acelerado en una dirección perpendicular a las isóbaras, desde la alta presión a la baja.

Esta aceleración de la masa de aire, combinada con la aceleración de Coriolis, resulta en una aceleración inclinada, perpendicular a la trayectoria de la masa de aire. A medida que esta masa va cruzando las isóbaras, y lo hace cada vez a mayor velocidad por ser un movimiento acelerado, se irá inclinando cada vez más, ya que, en todo momento, la aceleración de Coriolis continúa siendo perpendicular al movimiento de la masa de aire.

El proceso continúa hasta que las dos aceleraciones citadas son opuestas y se anulan mutuamente, quedando como resultante la velocidad final alcanzada por la masa de aire y de sentido paralelo a las isóbaras, que es el viento geostrófico. Se encuentra a altitudes sobre el terreno a unos 1 000 m y su velocidad se mide mediante globos meteorológicos.

2.3 Vientos a escala global

Los vientos a escala global circulan por todo el planeta, manteniendo cierta dirección durante todo el año. Forman circuitos que combinan movimientos verticales y horizontales de las masas de aire. Estos vientos pueden clasificarse en alisios, contralisios y circumpolares (ver figura 2.4).

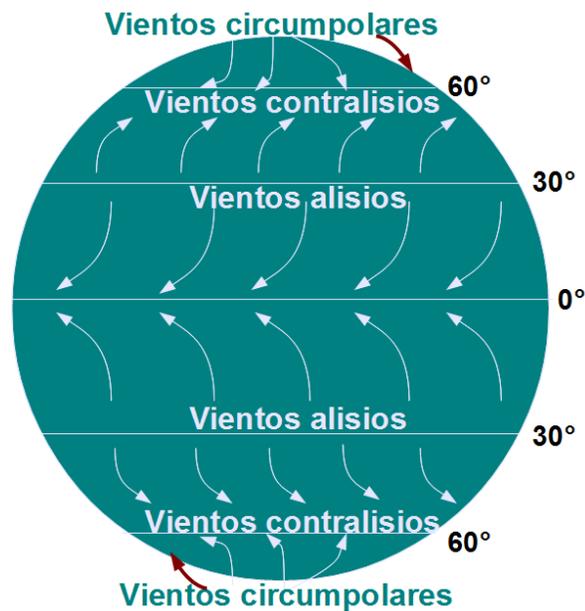


Figura 2.4 Vientos a escala global.

2.3.1 Vientos alisios

Los vientos alisios circulan desde los trópicos hacia el ecuador, desplazándose de este a oeste. Son regulares y constantes, por lo que mantienen la misma dirección. Al atravesar los océanos, se cargan de humedad y ascienden al impactarse contra los relieves terrestres, consiguiendo enfriarse y condensarse, posteriormente generando lluvia abundante.

2.3.2 Vientos contralisios

Los vientos contralisios se originan en los trópicos de Cáncer y de Capricornio y se desplazan hacia los círculos polares. Son vientos de elevada temperatura que al chocar con los vientos polares producen lluvias abundantes, denominadas lluvias de frente. Son vientos regulares y constantes, por lo que mantienen la misma dirección.

2.3.3 Vientos circumpolares

Los vientos circumpolares son producidos por el movimiento rotacional de la Tierra y por la

inclinación del eje terrestre. Son vientos sumamente fríos que se desplazan desde los polos hacia los círculos polares.

2.4 Circulación a escala regional

La circulación a escala regional es debida a la distribución de tierras y mares, así como a los grandes relieves continentales. Los vientos regionales establecen las condiciones meteorológicas de un territorio, como lo son la configuración isobárica y la posición de los frentes.

El comportamiento de los vientos regionales está determinado por desplazamientos a escala global de las masas de aire. Los vientos regionales reciben un nombre propio de acuerdo al territorio donde se originan. Algunos ejemplos de estos vientos son: el Burán que circula sobre el sur de Rusia, el Leung que afecta la zona costera China, el Narai que sopla la zona costera de Japón, el Pampero que circula en Argentina, el Simun que afecta gran parte de Arabia, el Siroco que sopla al norte de África y al sur de Europa, entre otros.

2.4.1 Circulación a pequeña escala

La circulación a pequeña escala es originada por el movimiento del aire existente en las capas bajas de la atmósfera, el cual es generado por los efectos que produce el mar, las montañas, la orografía del terreno. Tales efectos son los vientos locales, los vientos de superficie, la orografía del terreno, la cizalladura del viento, los vientos catabáticos y anabáticos y el efecto Föhn.

2.4.1.1 Vientos locales

Los vientos locales están regidos por desplazamientos a pequeña escala, los cuales circulan horizontalmente. La topografía del terreno tiene gran influencia sobre la dirección del viento a unos cuantos metros sobre el suelo.

2.4.1.2 Brisas costa-mar

Las brisas de costa-mar son vientos locales flojos que soplan desde el mar hacia la costa. Durante el día la superficie terrestre es calentada más rápidamente que el mar, por lo que el aire caliente asciende y deja una depresión. Por lo que el aire proveniente del mar que se encuentra a una menor temperatura, fluye hacia la tierra la cual posee una temperatura más elevada, tal fenómeno se conoce como *virazón*. Sin embargo, durante la noche, la tierra se enfría más rápidamente que el mar, por lo que el flujo de aire es inverso, dicho fenómeno se denomina *terral* (ver figura 2.5).



(a)

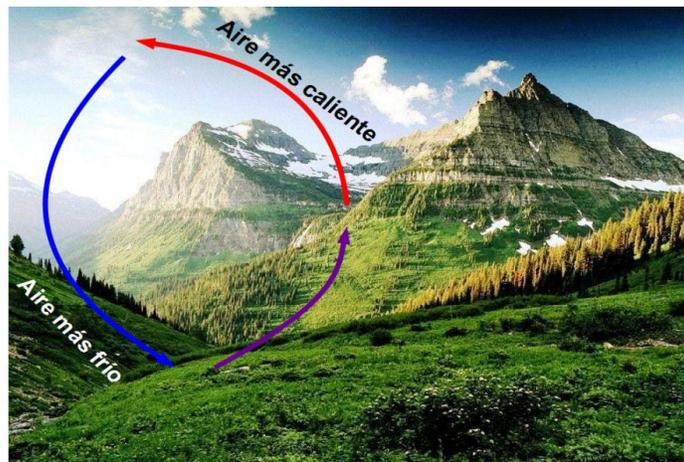


(b)

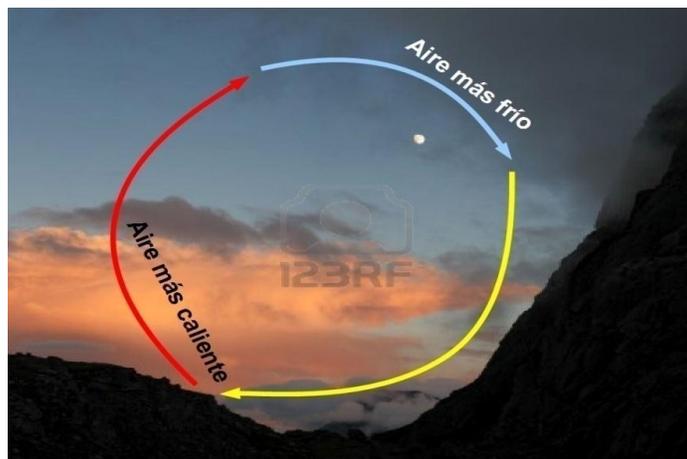
Figura 2.5 Brisas de costa-mar. (a) *Virazón* durante el día, (b) *terral* durante la noche.

2.4.1.3 Vientos montaña-valle

Los vientos de montaña–valle son corrientes de aire entre montañas y valles. Durante el día, se calientan con mayor facilidad las faldas de las montañas que el suelo de los valles, por lo que el aire caliente de la montaña sube, formándose una reducida baja de presión relativa en la falda, mientras que el aire más frío que fluye sobre el valle baja y comprime el aire adherido al valle conduciéndolo a lo largo de las faldas de la montaña para ocupar la baja presión, cerrándose así el sistema de circulación del aire (ver figura 2.6).



(a)



(b)

Figura 2.6 Brisas de montaña – valle. (a) Durante el día, (b) durante la noche.

2.4.1.4 Orografía del terreno

La orografía del terreno influye sobre el flujo del viento, ocasionando diversos fenómenos. Mientras más accidentes orográficos existan, la velocidad eólica será menor (ver figura 2.7).

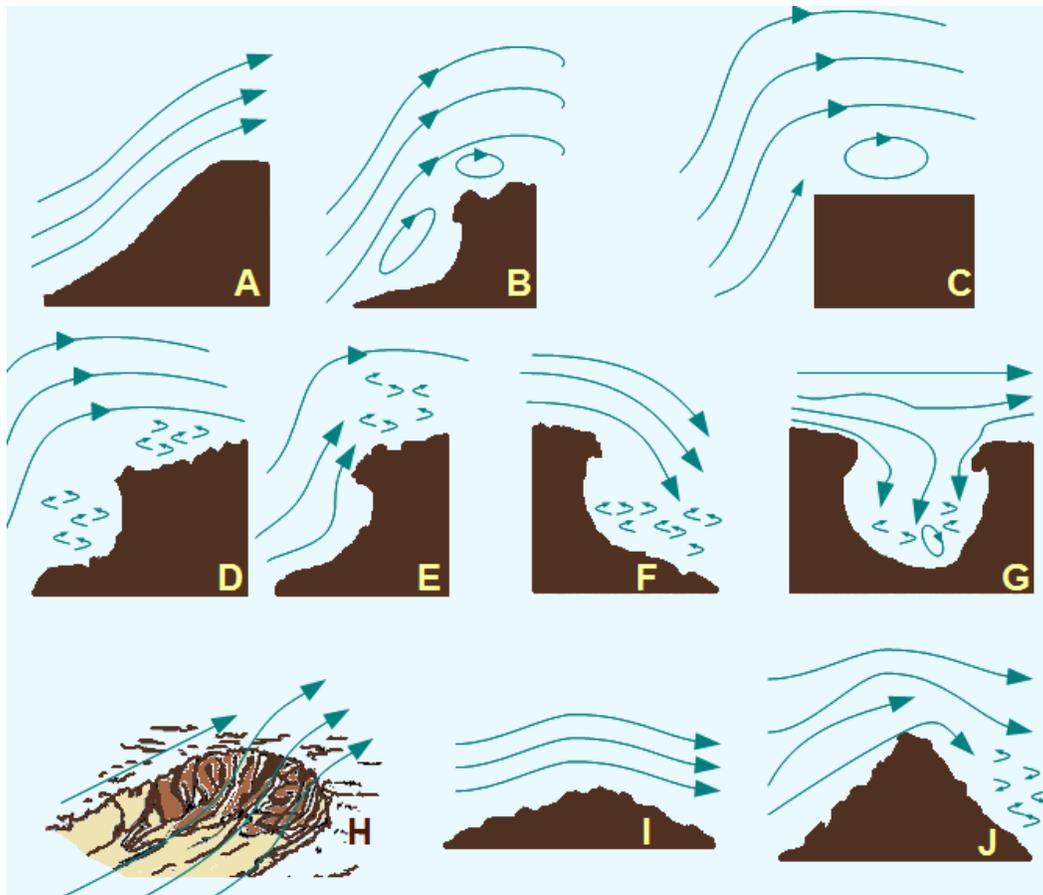


Figura 2.7 Efectos del relieve sobre el viento. (A) Con bordes redondeados en las laderas y en la cima se generan ascensos, (B) el contacto de vientos suaves con las aristas propician el surgimiento de vientos rotores, (C) el contacto de vientos suaves con los alrededores de un objeto provoca la formación de remolinos, (D) el contacto de vientos fuertes con las aristas de una montaña generan turbulencias, (E) el viento incidente sobre las salientes puede provocar severas turbulencias en la cima, (F) el viento que incidente sobre las salientes genera descendencias fuertes, (G) deslizamiento de una corriente de viento hacia el fondo de una depresión, (H) los movimientos eólicos a través de una depresión montañosa pueden generar fuertes turbulencias, (I) movimiento no turbulento sobre una pendiente no pronunciada, (J) los vientos laminares generan turbulencias al impactarse con pendientes muy inclinadas.

La rugosidad del terreno es un concepto que permite evaluar las condiciones del viento sobre la superficie terrestre. La longitud de rugosidad Z_0 es la altura sobre el terreno del punto en que la velocidad teórica del viento es 0. La expresión en metros de la rugosidad está dada por la ecuación 2.3.

$$Z_0 = 0.5 \frac{(h)(S)}{A_H} \dots (2.3)$$

Donde:

$h =$ *Altura*

$S =$ *Sección frente al viento de elementos de rugosidad del paisaje*

$A_H =$ *Área horizontal media correspondiente a cada elemento del paisaje*

Existen diversas clases de rugosidad, las cuales dependen directamente de la longitud de rugosidad.

2.4.1.5 Cizalladura

La cizalladura del viento también conocida como gradiente de viento, consiste en una variación repentina en la dirección y en la intensidad de una corriente de viento, la cual se presenta de manera vertical y en un espacio sumamente reducido. Suele dividirse en componentes vertical y horizontal.

La cizalladura horizontal del viento se dirige más allá de los *frentes* y cerca de la costa, mientras la cizalladura vertical se encuentra frecuentemente cerca de la superficie terrestre. Es un fenómeno meteorológico que ocurre a pequeña escala, pero puede estar asociada con rasgos de escala regional o escala global, tales como líneas de turbulencia y frentes fríos. La orografía y las construcciones urbanas son algunos de los factores desencadenantes. Representa un factor clave en la creación de tormentas severas y los riesgos adicionales de las turbulencias se asocian frecuentemente con este fenómeno (ver figura 2.8). Cuando el viento circula sobre una montaña, la cizalladura vertical se observa en el lado de sotavento.

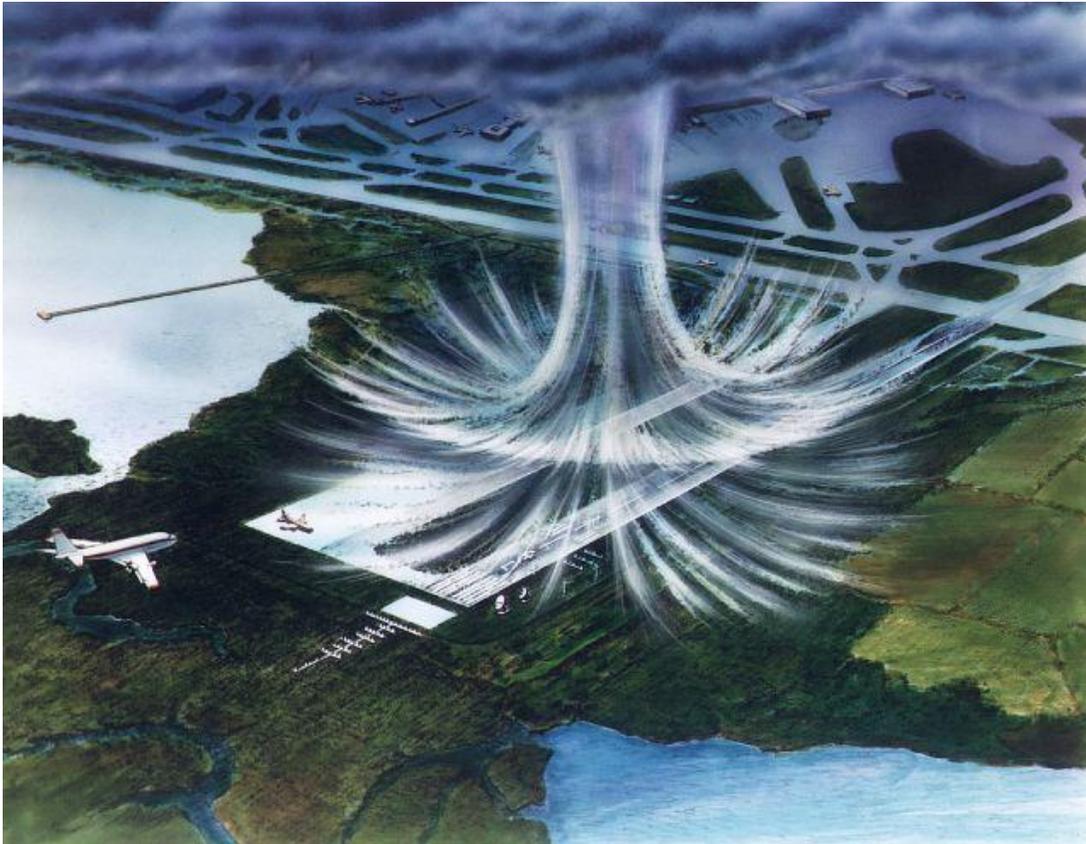


Figura 2.8 Los movimientos rotadores del viento asociados con las ondas de sotavento, representan un gran peligro para el ascenso y descenso de aeronaves.

2.4.1.6 Vientos catabáticos y anabáticos

Los vientos anabáticos y catabáticos, influyen sobre la circulación eólica a pequeña escala. El viento anabático es un viento húmedo y cálido, el cual presenta una componente vertical ascendente desde las zonas más bajas de una ladera hacia las más altas. Durante su trayectoria, éste viento se condensa, ocasionando la formación de nubes de tipo lenticular en la cima de la montaña.

El viento catabático se origina mediante el descenso a sotavento de aire fresco y seco desde regiones elevadas después de haberse condensado toda la humedad de lado de barlovento. Se encuentran en forma de brisas, a través de laderas y valles; es un fenómeno independiente a las isóbaras debido a que es conducido por la dirección de los valles a través de los cuales desciende.

2.4.1.7 Efecto Föhn

El efecto Föhn es un fenómeno característico de algunas regiones y surge cuando el aire es forzado a ascender por la ladera de una montaña. Se caracteriza por ser un viento fuerte, seco y cálido, se produce en ocasiones en la ladera de sotavento de las regiones montañosas. Se manifiesta precedido por un sistema de bajas presiones, el cual, durante su curso, ocasiona fuertes vientos en la tropósfera media y alta (ver figura 2.9).

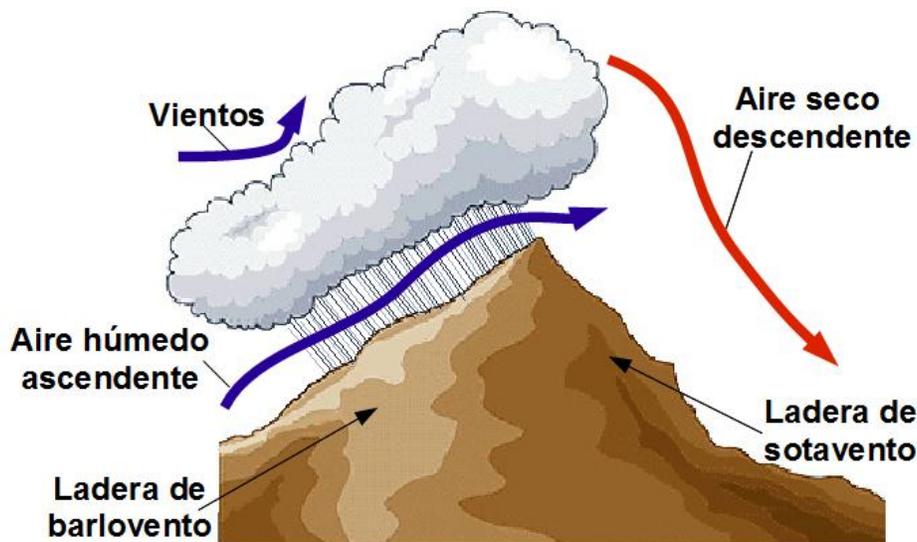


Figura 2.9 Efecto Föhn en una montaña.

2.5 Características del viento

La comprensión de las características del viento es fundamental para la explotación de la energía eólica, desde la identificación de los sitios adecuados y las predicciones de la viabilidad económica de proyectos de parques eólicos, hasta el diseño de aerogeneradores y los efectos de éstos sobre las redes de distribución eléctrica y consumidores.

Este recurso natural es sumamente variable. Tal variabilidad persiste por una amplia gama de escalas, tanto en el espacio como en el tiempo.

El viento se define principalmente por dos parámetros, la dirección y la velocidad. Debido a esto es que se considera un vector con magnitud (dada por la velocidad) y dirección. Climatológicamente, ambos parámetros son tratados como elementos relativamente independientes, asimismo los instrumentos para su medición son distintos.

La dirección del viento indica la procedencia de éste y conduce a la ejecución de la denominada rosa de vientos. La cual consiste en la representación de la frecuencia de ocurrencia eólica según la dirección de incidencia hacia el observador. Generalmente indica dieciséis sectores de dirección: E (Este), ENE (Este – Noreste), NE (Noreste), NNE (Norte – Noreste), O (Oeste), ONO (Oeste - Noroeste), NO (Noroeste), NNO (Norte – Noroeste), ESE (Este - Sureste), SE (Sureste), SSE (Sur – Sureste), S (Sur), SSO (Sur – Suroeste), N (Norte), OSO (Oeste – Suroeste), SO (Suroeste) (ver figura 2.10).

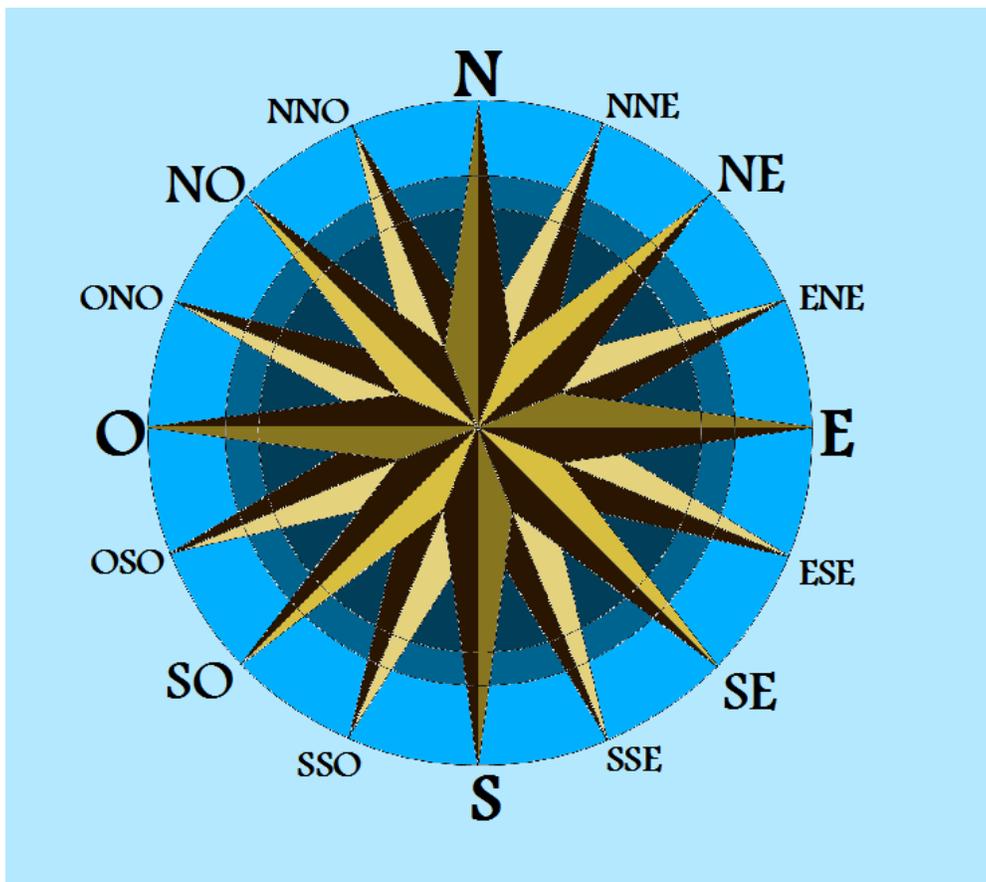


Figura 2.10 Rosa de los vientos.

Ocasionalmente, las rosas de los vientos son utilizadas para representar de manera gráfica la dirección de transporte dominante de los vientos de alguna área. La dirección del viento se registra mediante el uso de *veletas* (ver figura 2.11).



Figura 2.11 Veleta Windtec.

La dirección del viento depende de la distribución y evolución de los centros isobáricos; se desplaza de los centros de alta presión (*anticiclones*) y su fuerza es tanto mayor cuanto mayor es el gradiente de presiones.

2.5.1 Determinación de velocidad y dirección

La determinación de la dirección y velocidad del viento se lleva a cabo mediante el análisis de la distribución de la presión atmosférica en la superficie terrestre, para ello se utilizan mapas isobáricos. Se toman en cuenta dos principios generales:

- El viento siempre circula desde los ciclones a las borrascas.

- La velocidad de este se calcula en función de la cercanía existente entre las isóbaras, mientras más proximidad exista en ellas, la fuerza del viento será mayor, mientras que cuanto más separadas se encuentren, la fuerza será menor.

El contenido energético del viento depende de la velocidad, la cual se ve afectada por las características topográficas y rugosidad, ya que éstas producen diferencias de velocidad, provocando una reducción o una aceleración en la velocidad del viento.

2.5.2 Altura

La altura influye en la velocidad del viento. Cerca del suelo, la velocidad es baja, sin embargo puede incrementarse rápidamente al ascender. Tal variación (ver figura 2.12) puede representarse mediante la ecuación de tipo estadístico, conocida como ley exponencial de Hellmann:

$$V_h = V_{10} \left(\frac{h}{10}\right)^\alpha \dots (2.4)$$

Donde:

V_h = Velocidad del viento a una altura h

h = Altura

V_{10} = Velocidad del viento a 10 metros de altura

α = Exponente de Hellman

El valor del exponente de Hellman α varía según la rugosidad del terreno (ver tabla 2.1).

Tabla 2.1 Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno.

Tipo de terreno	Valor de α
Llano con hielo o hierba.	$\alpha = 0.08$ a 0.12
Llano (mar, costa).	$\alpha = 0.14$
Poco accidentado.	$\alpha = 0.13$ a 0.16

Zonas rústicas.	$\alpha = 0.2$
Accidentado o bosques.	$\alpha = 0.2$ a 0.26
Muy accidentado y ciudades.	$\alpha = 0.25$ a 0.4

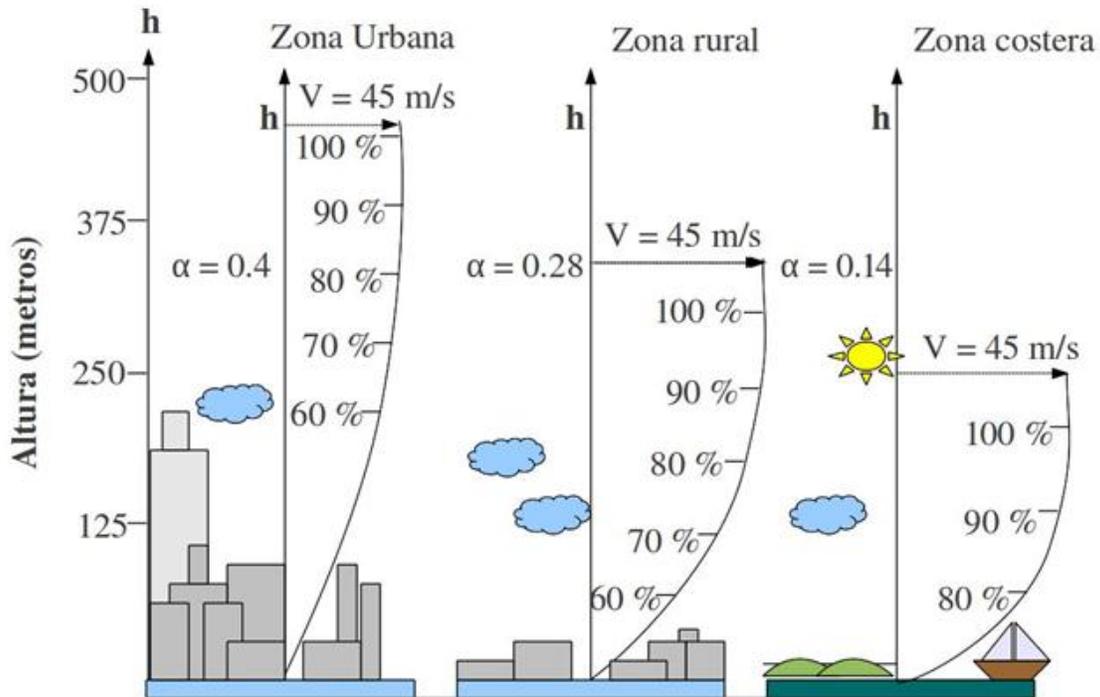


Figura 2.12 Variación de la velocidad del viento con relación a la altura, según la ley exponencial de Hellmann.

La curva de duración de la velocidad tiende a aplanarse cuando aumenta el tiempo durante el cual el viento persiste a una velocidad determinada. La velocidad media del viento puede representarse de la siguiente manera:

$$\hat{v} = \frac{1}{8760} \int_0^{8760} v dt \dots (2.5)$$

Mientras que la intensidad de la energía del viento, definida como la relación entre la potencia y la superficie frontal, es proporcional al cubo de la velocidad, es decir:

$$\frac{N_{viento}}{A} = I_h = I_{10} \left(\frac{h}{10}\right)^{3\alpha} = I_{10} \frac{V_h^3}{V_{10}^3} \dots (2.6)$$

Para medir la velocidad del viento se emplea el anemómetro (ver figura 2.13) constituido generalmente por un molinete de tres brazos que gira sobre un eje vertical al entrar en contacto con el viento, accionando un contador que indica la velocidad del viento incidente en base al número de revoluciones.

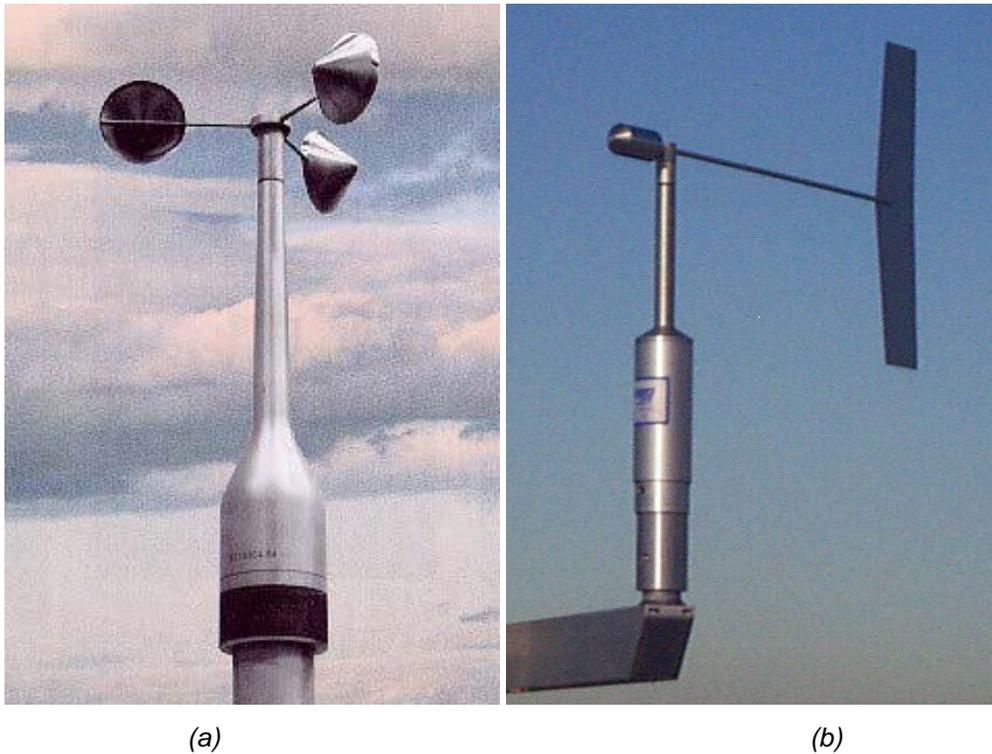


Figura 2.13 Los anemómetros miden la velocidad instantánea del viento. Existen diversos tipos de estos instrumentos. (a) Anemómetro de rotación, (b) anemómetro de compresión, basado en el tubo de Pitot.

En náutica la medición se expresa en nudos y mediante la escala de Beaufort (tabla 2.2), la cual describe la velocidad del viento, asignando números que van del cero al doce, según el grado de intensidad.

CAPÍTULO 2.
EL VIENTO COMO FUENTE ENERGÉTICA

Tabla 2.2 Escala de Beaufort, adaptada para uso no naval a partir de 1850 del siglo XIX, cuando los números de Beaufort se asociaron con las rotaciones de un anemómetro.

Escala	Velocidad del viento (km/h)	Nudos (millas náuticas/h)	Denominación	Aspecto del mar	Efectos terrestres
0	0 a 1	< 1	Calma.	Despejado.	Calma, el humo asciende verticalmente.
1	2 a 5	1 a 3	Ventolina.	Olas tenues, sin presencia de espuma.	El humo indica la dirección del viento.
2	6 a 11	4 a 6	Flojito (brisa muy débil).	Crestas de apariencia vítrea, sin romper.	Se mueven las hojas de los árboles.
3	12 a 19	7 a 10	Flojo (brisa débil).	Pequeñas olas, crestas rompientes.	Se agitan las hojas, ondulan las banderas.
4	20 a 28	11 a 16	Bonancible (brisa moderada).	Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas.	Se levanta polvo, se agitan las copas de los árboles.
5	29 a 38	17 a 21	Fresquito (brisa fresca).	Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes.	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada.
6	39 a 49	22 a 27	Fresco (brisa fuerte).	Comienzan a generarse olas grandes, crestas rompientes y espuma.	Se mueven las ramas de los árboles.
7	50 a 61	28 a 33	Frescachón (viento fuerte).	Mar gruesa, con espuma arrastrada en dirección del viento.	Se mueven los árboles grandes, dificultad para andar contra el viento.
8	62 a 74	34 a 40	Temporal (viento duro).	Grandes olas rompientes, franjas de espuma.	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas dificultosa.
9	75 a 88	41 a 47	Temporal fuerte (viento muy duro).	Olas muy grandes, rompientes. Visibilidad mermada.	Daños en árboles, imposible andar contra el viento.
10	89 a 102	48 a 55	Temporal duro (temporal).	Olas muy gruesas con crestas empenachadas. Superficie del mar blanca.	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones.
11	103 a 117	56 a 63	Temporal muy	Olas excepcionalmente	Estragos abundantes en

			duro (borrasca).	grandes, mar completamente blanca.	las construcciones, tejados y árboles.
12	118 y más	> 64	Temporal huracanado (huracán).	Aire lleno de espuma, visibilidad nula. Enorme oleaje.	Destrucción total.

La velocidad del viento en la escala de Beaufort puede expresarse por la ecuación 2.7.

$$v = 0,837 B^{3/2} m/s \dots (2.7)$$

2.5.3 Potencia

En un flujo de aire de densidad ρ y velocidad v , la potencia eólica disponible que cruza una superficie A y recorre una distancia L en un lapso de tiempo t , es representada mediante la siguiente expresión:

$$N_{viento} = \frac{E_{cinética}}{t} = \frac{\frac{m v^2}{2}}{t} = \frac{v^2}{2t} (v t A \rho) = \frac{\rho a v^3}{2} = k v^3 \dots (2.8)$$

Para un generador eólico de eje horizontal (ver figura 2.14) y diámetro de hélice D , la sección A está dada por:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \dots\dots (2.9)$$

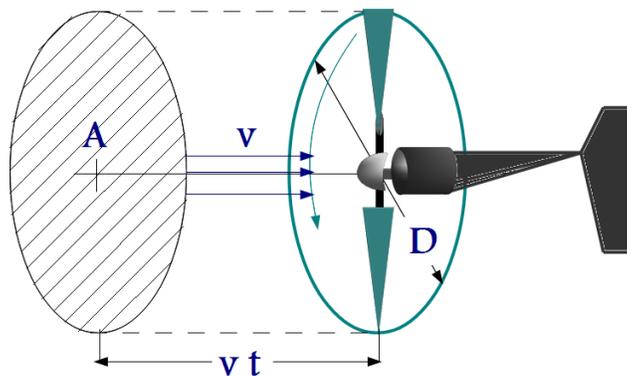


Figura 2.14 Área A barrida por el rotor de diámetro D.

Por tanto, la potencia del viento quedará en la forma:

$$N_{viento} = \frac{\pi \rho D^2 v^3}{8} \dots (2.10)$$

Las variaciones en la velocidad del viento y la potencia N dependen del tiempo. El valor medio de ambas durante un año, por ejemplo, puede expresarse de la siguiente manera:

$$\hat{N}_{viento\ anual} = \frac{1}{2} \rho A \hat{v}^3_{anual} \dots (2.11)$$

Debido a lo expuesto anteriormente, se obtienen las siguientes consecuencias:

- La potencia del viento sufre variaciones por efecto de la velocidad, por lo que es preciso realizar las mediciones en el lugar exacto donde se requiera instalar el aerogenerador.
- La potencia del viento sufre variaciones debidas a la densidad del aire, la cual es una consecuencia de las variaciones de presión y temperatura.

La potencia eléctrica generada para cada velocidad del viento puede expresarse mediante un gráfico denominado curva de potencia de un aerogenerador. Estas se obtienen a partir de mediciones de campo, donde un anemómetro situado en un mástil captura velocidades del viento, mientras que la potencia eléctrica se lee directamente de los aparatos de control del aerogenerador. Las curvas que relacionan la velocidad del viento con el número de horas de funcionamiento del aerogenerador, indican el número de horas al año en que la velocidad del viento supera un cierto nivel.

A partir de tales curvas es posible obtener la curva de potencia disponible del viento, y la curva de potencia eléctrica suministrada por el aerogenerador. El área encerrada por esta, proporciona la energía eléctrica generada durante un año, siendo frecuente expresar estas potencias y energías,

por unidad de superficie barrida por el rotor. En la figura 2.15 puede observarse un ejemplo de curva de potencia.

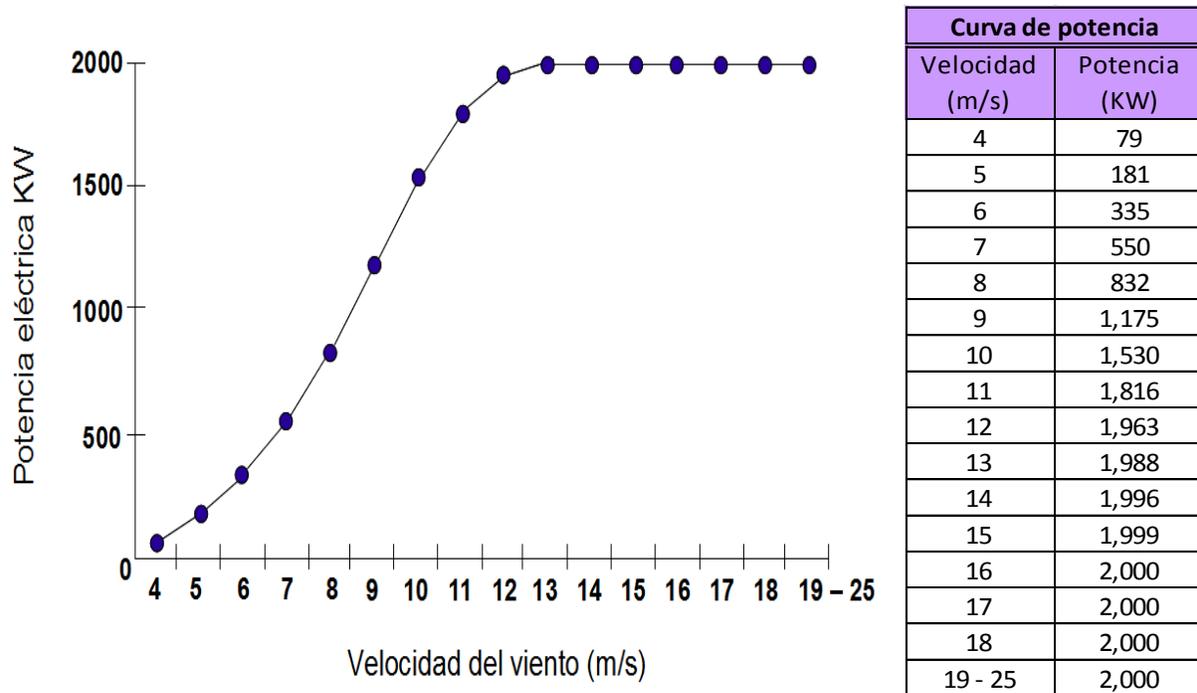


Figura 2.15 Ejemplo de una curva de potencia, donde la velocidad de arranque es de 4 m/s y la velocidad de corte 25 m/s.

2.6 Representación estadística del viento

Debido a las características aleatorias y dispersas de la energía eólica, se emplean métodos estadísticos para determinar si un emplazamiento es adecuado o no. Para ello se representa a la velocidad del viento como una variable aleatoria con una cierta función de distribución.

Generalmente se emplea la *distribución de Weibull*, la cual representa la variación en la velocidad media del viento por hora para periodos mayores a un año en diversos sitios, con una gran precisión. Esta consiste en la distribución de dos parámetros, el *parámetro de escala A* y el *parámetro de forma k*.

Tal distribución puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Phi = 1 - e^{-\left(\frac{V_v}{A}\right)^k} \dots (2.12)$$

Donde:

Φ = *Función de distribución*

V_v = *Velocidad del viento*

e = *Base logarítmica (normalmente el logaritmo natural log, $e = 2.781$)*

A = *Parámetro de escala*

k = *Parámetro de forma*

La energía \hat{N} que portaría el viento si se desplaza con una velocidad igual a la media durante las ocho mil setecientos sesenta horas del año, puede representarse de la siguiente manera:

$$\hat{N} = \int_0^{8760} k \hat{v}^3 dt = 8,760 k \hat{v}^3 = 4,380 \rho A \hat{v}^3 \dots (2.13)$$

Mientras que la energía anual disponible es:

$$N_{anual} = \int_0^{8760} k v^3 dt \dots (2.14)$$

El factor de distribución de forma de la energía eólica k , representa la energía obtenida durante un año, N_{anual} , y la energía \hat{N} que se obtendría en ese año si la velocidad del viento se mantuviera constante e igual a la velocidad media \hat{v} , es decir:

$$k = \frac{N_{anual}}{\hat{N}} = \frac{v^3}{\hat{v}^3} \dots (2.15)$$

En dos sitios en los que la velocidad media del viento v sea igual, se dispondrá de más energía en aquel en el cual el factor de distribución k sea mayor. Si los factores de distribución k_1 y k_2 , y las energías disponibles son N_1 y N_2 , se tiene que:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{k_1}{k_2} \left(\frac{\hat{v}_1}{\hat{v}_2} \right)^3 \dots (2.16)$$

Generalmente los valores de k están comprendidos entre 1.3 y 4.3; por lo que no se dispone de muchos datos, es aceptable asignar $k = 2$, en este caso, a la distribución resultante se le conoce como la *distribución de Rayleigh*. Con los datos de la velocidad del viento de un determinado lugar, ésta describe la distribución de las velocidades del viento con una aproximación razonable dentro de ciertos límites.

Esta aplicación posee poca precisión para velocidades de viento inferiores a 15 Km/h. La utilidad de su aplicación en velocidades inferiores a 13 Km/h es nula.

La curva de distribución de Rayleigh puede expresarse de la siguiente manera:

$$t = 8.76 \frac{\pi}{2} \frac{v}{\hat{v}} e^{-\xi}; \quad \xi = \frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\hat{v}} \right)^2 \dots (2.17)$$

Tomando el tiempo en horas.

Donde:

$v =$ *velocidad del viento en millas/segundo*

$\hat{v} =$ *velocidad media del viento*

Tal ecuación aporta el número total de horas al año que se predice que pueda circular el viento a una velocidad \bar{v} , siendo \hat{v} la velocidad media en determinado lugar.

La energía del viento es de tipo cinético: cuando una masa de aire m se mueve con una velocidad v , su energía cinética viene dada por la conocida expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad [\text{Julios}] \dots (2.18)$$

La masa de aire, de densidad ρ , que pasa por la unidad de tiempo (caudal másico M) a través de una sección de área perpendicular a su dirección S , posee un valor:

$$M = \rho S v \text{ [Kg/s]} \dots (2.19)$$

De manera que teóricamente, la energía recuperable por unidad de tiempo, es decir la potencia P_t es:

$$P_t = \frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} \rho S v^3 \text{ [Watts]} \dots (2.20)$$

Considerando constante la densidad del aire e igual a 1.25 Kg/m^3 , se tendrá:

$$P_t = 0.625 S v^3 \text{ [Watts]} \dots (2.21)$$

La potencia eólica teórica no sólo depende del área de la superficie captadora, sino mayormente de la velocidad del viento.

Sin embargo, Betz demostró que no es posible extraer toda la energía del viento. En su teorema expresa que el viento que pasa a través de un dispositivo captador de energía eólica reduce su velocidad como máximo en $2/3$ de su valor inicial, lo que equivale a la extracción del 59 % de la energía cinética inicial del viento. El máximo teórico de potencia que se puede obtener de un captador eólico sería:

$$P_{m\acute{a}x} = (0.59) (0.625 v^3) = 0.37 S v^3 \text{ [Watts]} \dots (2.22)$$

Lo que se lograría con un dispositivo de captación ideal.

**CAPÍTULO 3.
AEROGENERADORES**

3.1 Generalidades

El aerogenerador constituye el principal elemento de los sistemas de aprovechamiento de energía del viento. Está compuesta por un arreglo de palas o aspas soportadas por un eje común o una torre, que giran al ser atravesadas por una masa de aire.

Es un dispositivo mediante el cual se obtiene electricidad, debido a que el movimiento de sus aspas activa un generador eléctrico que transforma la energía mecánica producida por la rotación en energía eléctrica, y esta última puede almacenarse en baterías o conectarse a la red de manera directa (ver figura 3.1).



Figura 3.1 Aerogenerador ECO 100 de la empresa Alstom, instalado en el parque eólico de La Collada, en El Perelló, Tarragona, España. Posee la capacidad de generar 3 MW, la cual es suficiente para proporcionar energía a unas ocho mil familias.

3.2 Antecedentes

Con el avance de la agricultura, el ser humano necesitó herramientas que lo ayudasen a realizar sus actividades, tales como la molienda de grano, el bombeo de agua y la navegación. Esto condujo al desarrollo de primitivos molinos de viento. El primer registro histórico de la utilización de la energía eólica mediante estos artefactos, data alrededor de 200 a.C. en Persia (ver figura 3.2 (a)), no obstante se cree que su invención surgió en China (2,000 a.C.) y Babilonia (alrededor de 1,700 a.C.) donde se utilizaban rústicos molinos de viento para el riego.

Un importante desarrollo de la tecnología primitiva fueron los molinos de viento con velas apoyadas en un eje horizontal, los cuales se encontraron en las islas griegas del Mediterráneo (ver figura 3.2 (b)).

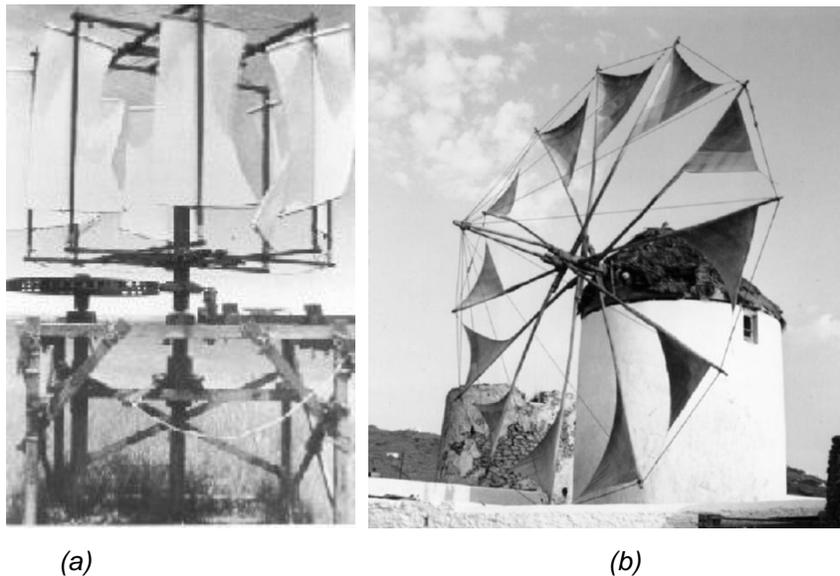


Figura 3.2 Molinos de viento utilizados en la antigüedad.

(a) Réplica estadounidense del siglo XIX de un molino de viento estilo persa de eje

En el continente europeo, la introducción de los molinos de viento se llevó a cabo durante las Cruzadas. En el Siglo XII, comenzaron a utilizarse molinos de eje horizontal en países como

Inglaterra, Francia y Holanda. Durante la Edad Media, debido a las leyes feudales se rechazó el permiso para construir molinos de viento por los campesinos, lo que los obligaba a usar los molinos de los señores feudales para moler su grano. También se prohibió la plantación de árboles en zonas aledañas de los estos molinos, con el propósito de asegurar el llamado “derecho de viento”. No obstante, esta tecnología influyo de manera significativa en la economía agrícola durante varios siglos. Se desarrollaron las aspas, los ejes y los sistemas de control, lo cual permitió extender las aplicaciones de la energía cinética del viento.

Entre los siglos XVII y XIX, en los Países Bajos, los molinos de viento fueron utilizados para el drenaje de polders como el de Beemster, ubicado en la provincia de Holanda Septentrional (ver figura 3.3), al igual que el de Schermer, el cual fue drenado por treinta y seis molinos de viento durante cuatro años en un flujo total de 1,000 m³/min (metro cúbico por minuto).



Figura 3.3 La zona del polder de Beemster, se encontraba a 3 m por debajo del nivel del mar, sin embargo fue drenado en el periodo comprendido entre 1608 y 1612, mediante veintiséis molinos, cada uno con una potencia aproximada de 50 HP (caballos de fuerza).

En Holanda, existió gran variedad de aplicaciones para los molinos de viento, se utilizaron en la producción de aceite vegetal (1582 d.C.), en la industria papelera (el primero fue construido en 1586 d.C. debido a las consecuentes necesidades de papel por el surgimiento de la imprenta). A finales del siglo XVI, comenzaron a utilizarse molinos de viento para procesar maderas provenientes del Mar Báltico. A mediados del siglo XIX ya existían nueve mil de ellos instalados en los Países Bajos.

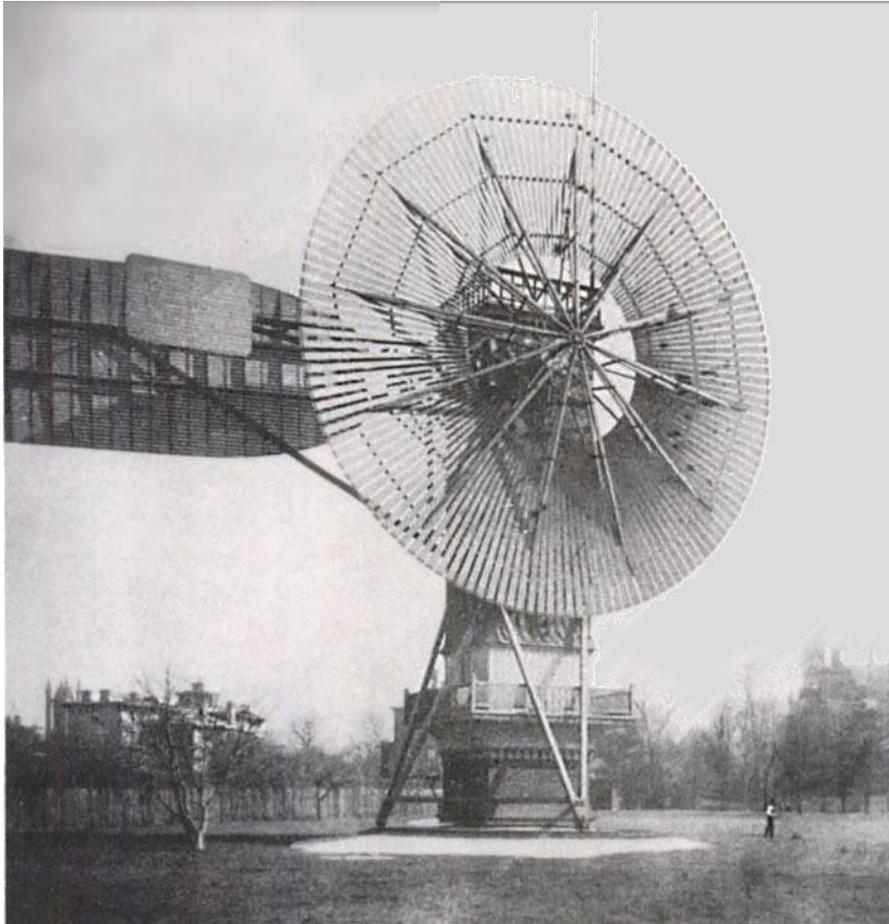
Durante el mismo siglo se construye el primer molino multipala (Leopold Jacob en 1724), cuyo diseño se basó en un rotor que accionaba un pistón. Su uso fue extendido en Norteamérica y principalmente se utilizó para el bombeo (ver figura 3.4).



Figura 3.4 Molino multipala de Leopold Jacob.

Con el arribo de la Revolución Industrial en el siglo XIX, el uso de los molinos de viento sufrió un declive significativo, ya que se optó por los económicos motores impulsados por combustibles fósiles. Sin embargo, a finales de siglo, comenzó el desarrollo e investigación de la generación eléctrica mediante el uso de turbinas de viento.

En el año de 1888, en Cleveland, Ohio (EUA), uno de los fundadores de la industria eléctrica americana, Charles Brush, construyó la primera turbina eólica de funcionamiento automático para la generación de electricidad, la cual poseía un rotor de 17 m de diámetro y ciento cuarenta y cuatro palas fabricadas en madera de cedro. A pesar de las magnitudes de la turbina, el generador era de 12 KW (ver figura 3.5).



*Figura 3.5 Molino diseñado y construido por Charles Brush.
Considerado el molino más grande del mundo.*

En 1892, un profesor danés, Lacour, diseña un aerogenerador, el cual consistía en una máquina de cuatro palas, con una altura de buje de 24 m y un diámetro de rotor de 25 m, cuya potencia se encontraba entre 5 KW y 25 KW. Durante el periodo comprendido entre 1891 y 1918, Lacour construyó más de cien aerogeneradores de 20 KW a 35 KW. Su diseño se basó en los molinos daneses (ver figura 3.6).

Durante el siglo XX, la tecnología eólica asciende debido a los avances en las áreas de la aerodinámica, la resistencia de materiales, la electricidad, la electrónica y los métodos del cálculo.

En 1927, el físico alemán Albert Betz realizó un trabajo llamado “Die Windmuhlen im lichte neverer Forschung”. En él demostró que el rendimiento de las turbinas aumentaba con la velocidad de rotación, y que cuanto mayor era esta última menos importaba el número de palas.

Durante el mismo año, el holandés A.J. Dekker construye un rotor provisto de palas con sección aerodinámica, capaz de multiplicar cuatro o cinco veces la velocidad del viento incidente en la punta de sus palas.



Figura 3.6 Dos de los aerogeneradores de prueba construidos por Lacour en 1897, Instituto de Askov Folk en Askov, Dinamarca.

Los diseños de Lacour fueron seguidas por una serie de turbinas fabricadas por Lykkegaard Ltd. Y F.L. Smidth and Co. antes de la Segunda Guerra Mundial. La capacidad de éstas variaba entre los 30 KW y 60 KW.

La producción de corriente directa continuó en sistemas de pequeña escala, aislados de la red, hasta 1930 cuando la primera turbina eólica de gran escala y de corriente alterna se construyó en Estados Unidos de América. La cual se denominó Smith – Putnam, y fue instalada en Grandpa's Knob, en el estado de Vermont. Su diámetro correspondía a 53.3 m, potencia nominal de 1.25 MW, estaba constituido por dos palas (ver figura 3.7).



Figura 3.7 Diseño Smith – Putnam, durante largo tiempo se consideró la turbina de mayor potencia.

Justo después de la Segunda Guerra Mundial, Johanes Juul, instaló un aerogenerador de 200 KW, en Gedser, al sureste de Dinamarca (ver figura 3.8), este se constituía por una hélice de tres palas de 24 m de diámetro, el cual se regulaba mediante alerones en los extremos.



Figura 3.8 Aerogenerador diseñado por Johanes Juul, instalado en Gedser.

Esta máquina de tres palas se caracteriza principalmente por poseer una caseta aerodinámica para el control de la energía y utilizar un motor de inducción en lugar de los convencionales generadores sincrónicos, eso le proporciona mayor facilidad para conectarse a la red.

Durante la década de los 50's del siglo XX, en Alemania, Ulrich Hütter presentó un trabajo sobre la aplicación de la aerodinámica moderna en el diseño de la turbina eólica, muchos de los

conceptos relacionados se encuentran en uso actualmente.

El desarrollo de la tecnología eólica se detuvo en el periodo de 1950 a 1970, debido a las crisis energéticas que se presentaron. Después de la crisis, varios países comenzaron a interesarse por la energía eólica. En países como Alemania, Dinamarca, Suecia, Reino Unido y la Unión Americana, las compañías de energía centraron su atención hacia la construcción de aerogeneradores.

En 1977, en Dinamarca, el aerogenerador TVIND comenzó a operar con una potencia nominal de 2 MW (ver figura 3.9). Está constituido por un rotor a *sotavento*, con un diámetro de 54 m, el cual gira a velocidad variable con un generador síncrono y una *conexión indirecta a la red*.



Figura 3.9 Aerogenerador TVIND.

Finalmente, surgen versiones mejoras del aerogenerador de Gedser, que resultaron ser los más competentemente comerciales, aunque presentaron deficiencias mecánicas y financieras.

El aerogenerador Bonus de 30 KW fue fabricado en 1980 y representa el modelo de los fabricantes de la actualidad (ver figura 3.10).



Figura 3.10 Aerogenerador Bonus 30 KW.

La década de los 90's del siglo XX, representa un resurgimiento en el campo de la energía eólica, ya que su capacidad instalada aumento más de cinco veces.

La tecnología utilizada en los parques eólicos actuales son aerogeneradores de 40 m a 60 m de diámetro de rotor, y una potencia de 500 KW a 1,500 KW. La fabricación de pequeñas máquinas resultó costosa en países donde la red de distribución era extendida. La rentabilidad de esta tecnología implica la disminución de costos.

En la mayoría de los casos, se han utilizado aerogeneradores tripala con viento de frente (*barlovento*), con torre tubular, con *regulación por pérdida o cambio de paso* y *sistema de orientación activa*.

La mejora de los componentes y la producción en serie ha permitido el descenso de los costos de los aerogeneradores, al igual que los del mantenimiento y la explotación. Tales mejoras consisten en la optimización de los diseños de los equipos, la utilización de materiales compuestos de alta resistencia por unidad de masa usados en las palas, los aceros de alta dureza y transistores de potencia capaces de trabajar a altas frecuencias, corrientes y voltajes, entre otras.

En los últimos años, se ha incrementado el desarrollo de las turbinas *multimegawatt*, así como su instalación y operación (ver figura 3.11).



Figura 3.11 El aerogenerador General Electric posee una capacidad de 3.6 MW y un rotor de 106 m de diámetro. (a) Instalación en tierra. (b) instalación en mar.

Los equipos utilizados en la actualidad son altamente confiables, con niveles de disponibilidad de 98% y mantenidos durante largos periodos.

El incremento del tamaño de los aerogeneradores y su nivel de tecnología, aunado al creciente volumen de producción, ha provocado la reducción del precio de la electricidad eólica hasta competir con la electricidad obtenida de las plantas termoeléctricas de ciclo combinado que operan con gas combustible.

Los parques eólicos marinos en Europa pueden llegar a generar una parte importante de la electricidad requerida.

Se han desarrollado algunos prototipos de máquinas de alta potencia, un ejemplo es el aerogenerador de la firma alemana REpower, el cual tiene una capacidad de potencia de 5 MW, y una turbina regulada por variación del paso, tren de fuerza con multiplicador de velocidad, generador de alta velocidad asincrónico de rotor bobinado y con velocidad variable (ver figura 3.12).



Figura 3.12 Vista del aerogenerador REpower 5M de 5 MW.

Al igual se encuentra el aerogenerador E-112 de la firma alemana Enercon con una potencia nominal de 6 MW (ver figura 3.13). Este equipo utiliza un tren de fuerza de accionamiento directo y generador sincrónico de velocidad variable con convertidor de frecuencia. El rotor tiene 114 m de diámetro y su eje se encuentra a 120 m de altura, su góndola pesa 480 toneladas.



Figura 3.13 Enercon E-112 de 6 MW.

3.3 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de un aerogenerador se basa en la *aerodinámica*, debido a la similitud existente entre las palas de éste y las alas de un avión, así como de las fuerzas que actúan sobre las caras superior (*extradós*) e inferior (*intradós*) de sus perfiles aerodinámicos inclinados (ver figura 3.14).

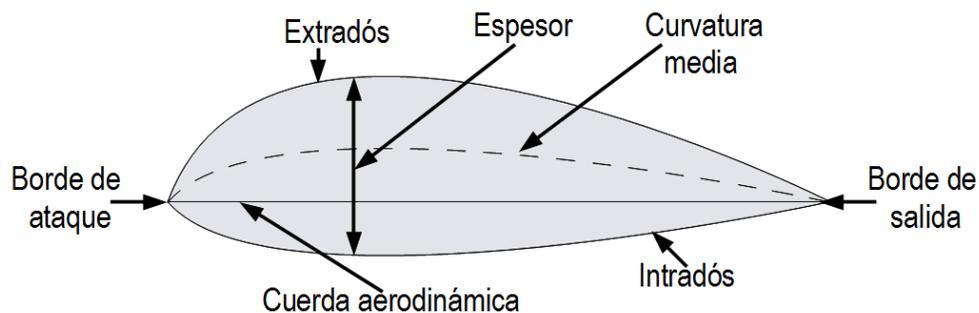


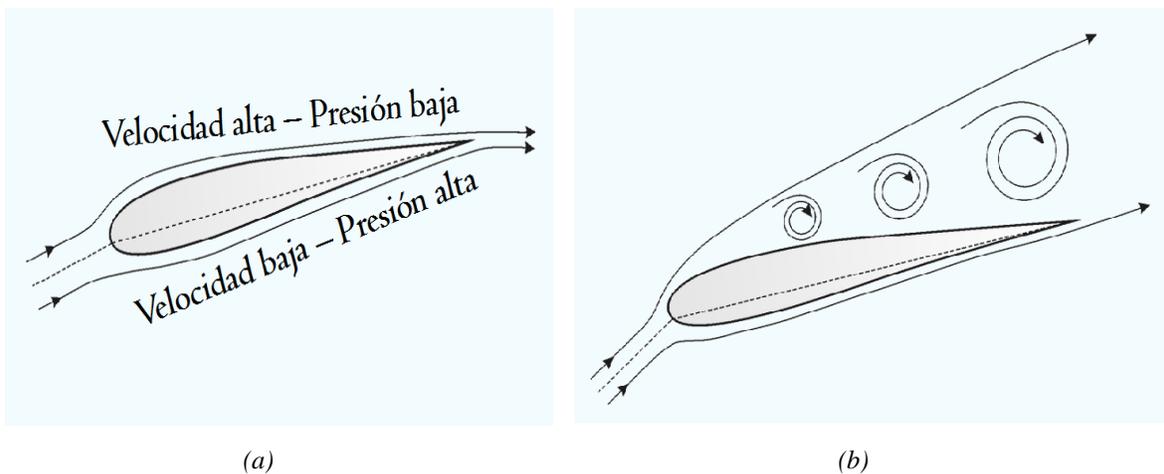
Figura 3.14 Perfil de una pala.

Es importante mencionar el teorema de Bernoulli, el cual relaciona la presión (p) y la velocidad (v) del aire (densidad ρ) entre dos puntos ubicados a una altura equivalente en el seno de un flujo de corriente (uno cercano a las palas y otro en el *extradós*), lo que es representado mediante la fórmula:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = \text{constante} \dots (3.1)$$

Por ello cuando ocurre un incremento en la velocidad del aire, la presión disminuye, mientras que una disminución en tal velocidad permite un aumento de presión.

Las partículas de aire que fluyen delante y detrás de las palas deben llegar al mismo tiempo al borde de salida. Por lo tanto, la velocidad del aire es mayor en el extradós, debido a que posee una longitud mayor, y a consecuencia existirá una menor presión. Mientras tanto en el intradós, al ser menor la velocidad del aire, habrá una mayor presión (ver figura 3.15).



*Figura 3.15 Comportamiento de un perfil de pala.
(a) Comportamiento normal, (b) pérdida aerodinámica.*

Tal diferencia de presiones entre ambas caras produce la fuerza resultante mencionada anteriormente, cuyas componentes son: la fuerza neta en la dirección del eje del movimiento, que es la que hace girar las palas, es decir, la *fuerza de sustentación* F_s que es la componente

perpendicular a la *velocidad del viento relativa* U_r al movimiento de la pala y la fuerza perpendicular al plano de rotación de las palas, en la misma dirección del viento, la cual es la que debe resistir la torre de soporte (*fuerza de arrastre* F_r). La resultante de estas dos fuerzas puede descomponerse en una fuerza tangencial F_t y una normal F_e .

La componente F_t actúa en el sentido del movimiento de las palas, siendo la responsable de la aparición del par motor en el eje de la turbina. La componente normal F_e o fuerza de empuje no realiza ningún trabajo y debe soportarla la torre del aerogenerador (ver figura 3.16).

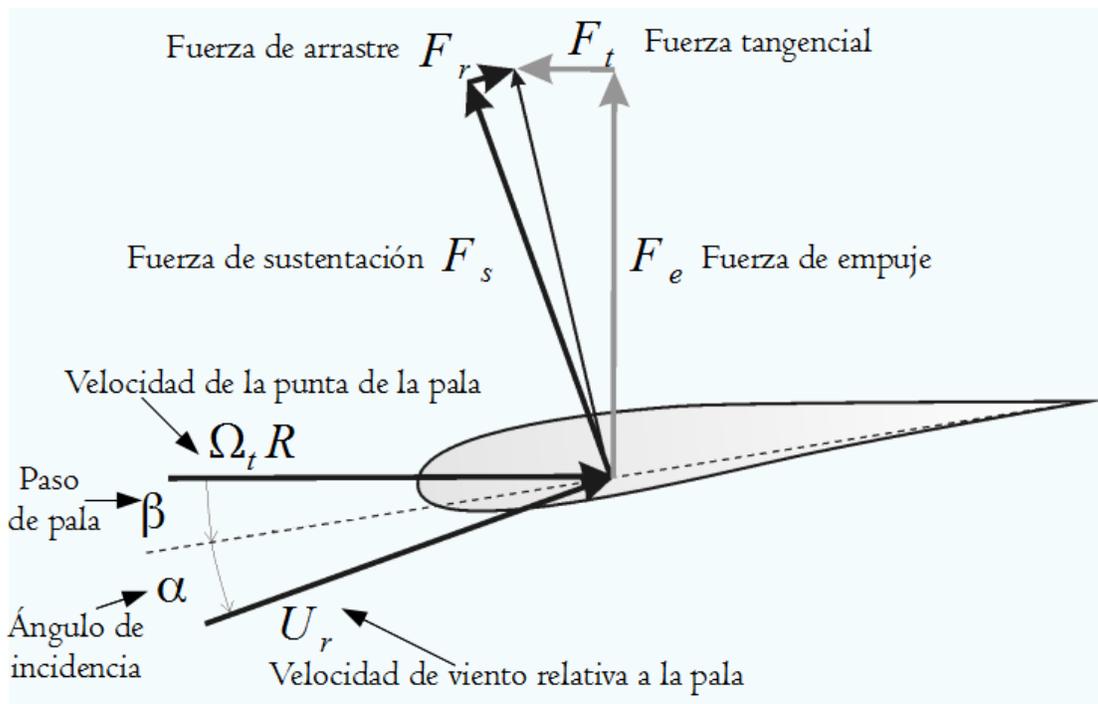


Figura 3.16 Velocidades y fuerzas en un perfil de pala.

El funcionamiento de un aerogenerador depende de los componentes estructurales, el diseño aerodinámico, el sistema de conversión eléctrica y el sistema de control.

Con la realización de experimentos en un túnel de viento con un perfil asimétrico de pala y midiendo la fuerza de sustentación y la fuerza de arranque a diferentes ángulos de ataque α , se obtiene un coeficiente de sustentación C_s sin dimensiones:

$$C_s = \frac{F_s}{1/2 \rho C v^2} \dots (3.2)$$

Siendo:

F_s = Fuerza de sustentación

ρ = Densidad del aire

C = Cuerda

v = Velocidad del viento

El valor del coeficiente de sustentación C_s en función del ángulo de ataque α puede apreciarse en la figura 3.17, en la curva se aprecia que la fuerza de sustentación F_s aumenta de manera proporcional al ángulo de ataque α y que se anula cuando el valor de este último es aproximadamente de 18° . En tales condiciones, los filetes de aire son incapaces de seguir el perfil, abandonándolo en forma de remolinos.

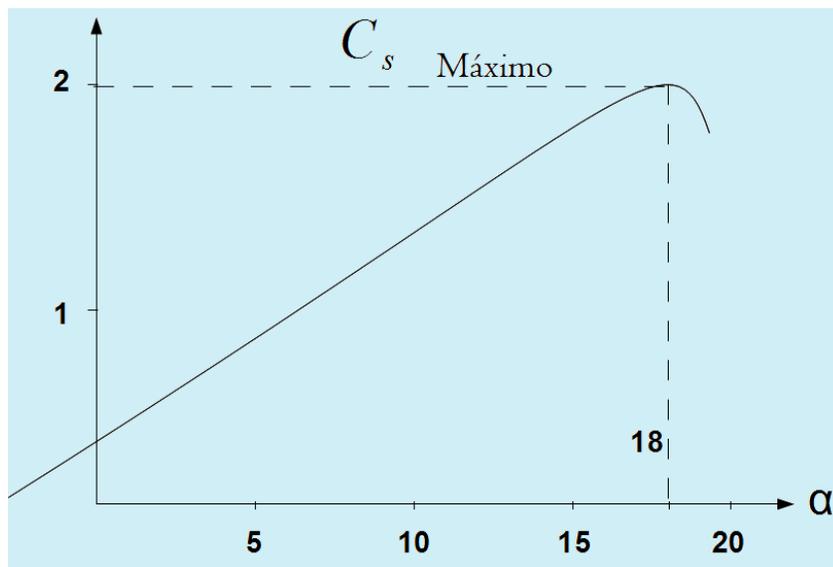


Figura 3.17 Coeficiente de sustentación.

De igual manera, puede obtenerse el coeficiente de arrastre C_r , es decir:

$$C_r = \frac{F_r}{1/2 \rho C v^2} \dots (3.3)$$

Donde:

$F_r =$ Fuerza de arrastre

$\rho =$ Densidad del aire

$C =$ Cuerda

$v =$ Velocidad del viento

El valor del coeficiente de arrastre C_r en función del ángulo de ataque α se encuentra representado en la curva de la figura 3.18. Tal coeficiente es mínimo para un ángulo de ataque ligeramente negativo, el cual se incrementa exponencialmente.

El arreglo de palas con respecto al viento y al eje de rotación, influirá determinando el tipo dominante de la fuerza que se genera por el par motor, es decir de arrastre o sustentación.

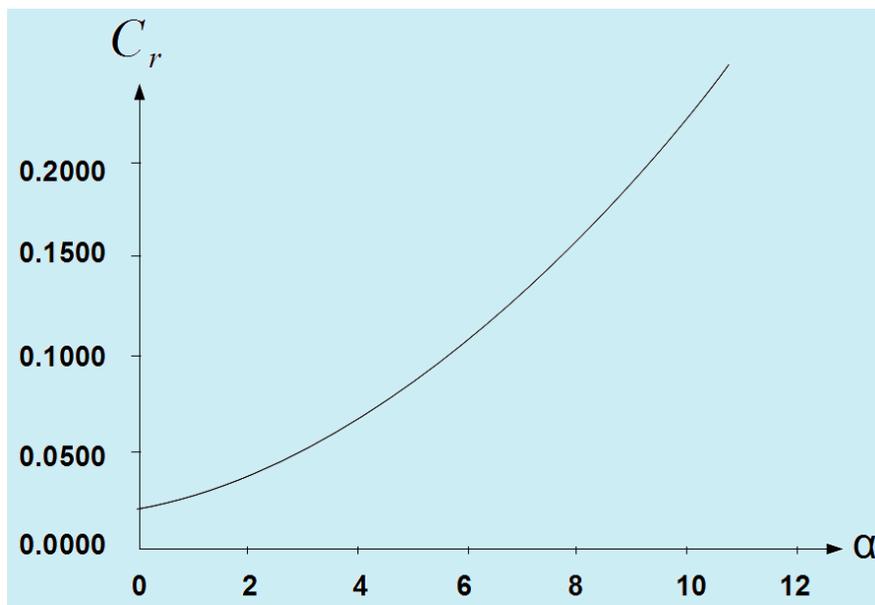


Figura 3.18 Coeficiente de arrastre.

La relación equivalente entre los anteriores coeficientes para diversos ángulos de ataque, puede representarse mediante la curva polar (ver figura 3.19). El rendimiento aerodinámico es mayor cuanto mayor sea la relación C_s/C_r , ésta última es denominada finura aerodinámica. La tangente desde el origen de coordenadas a la curva polar proporciona la finura aerodinámica máxima.

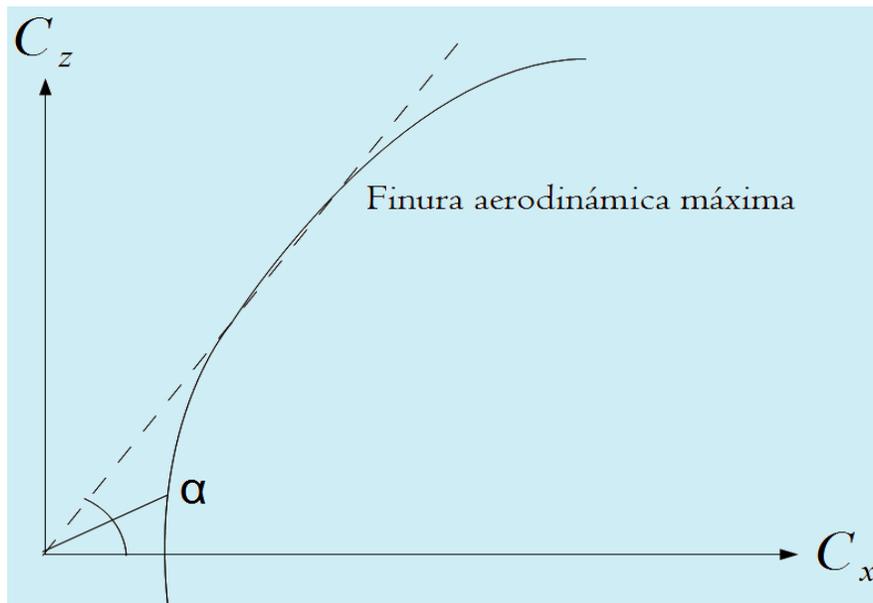


Figura 3.19 Curva polar.

3.4 Composición

Un aerogenerador es fundamentalmente un generador eléctrico, movido por una turbina la que es accionada por el viento, ésta proporciona energía mecánica a un rotor, generalmente compuesto por una hélice que a través de un sistema de transmisión hace girar el rotor de un generador (alternador trifásico) que transforma la energía mecánica en electricidad.

Para efectuar dicho funcionamiento, el aerogenerador está conformado por varios elementos, en los de eje horizontal se encuentran:

- Cimentación: Se emplea para garantizar la estabilidad de la turbina, estos pueden ser superficiales y profundos. El tipo de cimentación empleado depende de la consistencia del suelo donde se instalará el equipo (ver figura 3.20).



Figura 3.20 Cimentación para una torre tubular de acero.

- Torre: La función de este elemento es la de absorber las cargas causadas por la variación de la potencia del viento, así como proporcionar soporte a la góndola y a las palas del rotor. Entre los principales tipos de torres se encuentran las tubulares de acero, de concreto, de celosía, híbridas y de mástil tensado. La altura de las torres varía según el diámetro del rotor y la potencia nominal de la turbina (ver figura 3.21).



Figura 3.21 Aerogeneradores con torres de celosía (a los extremos) y con torre de acero tubular (al centro).

- Góndola: Brinda soporte y protección a la maquinaria de la turbina (ver figura 3.22), también aísla el ruido generado por el aerogenerador. La capota se encuentra conectada al chasis, sobre el que se colocan los componentes.

Está construida por poliéster y fibra de vidrio, mientras que su exterior se encuentra cubierto con *gelcoat*, ocasionando una mejor protección contra erosiones derivadas de vientos y del medio marino.

Posee tomas de aire para el sistema de refrigeración, pararrayos y un sistema de medición del viento.

El chasis se encuentra fraccionado, con una zona frontal en la que se da soporte y transmisión de cargas del rotor y del tren de potencia y los almacenes de potencia y equipos auxiliares.



Figura 3.22 La góndola de un aerogenerador.

(a) Góndola de la turbina Nordex N – 60, (b) molde de la góndola de la turbina Nordex N – 80 con bridas en la base para el generador.

Posee un sistema de seguimiento, con el cual adquiere la capacidad de girar en dirección del viento. Su diseño varía dependiendo del arreglo de los componentes ubicados en su interior (ver figura 3.23).

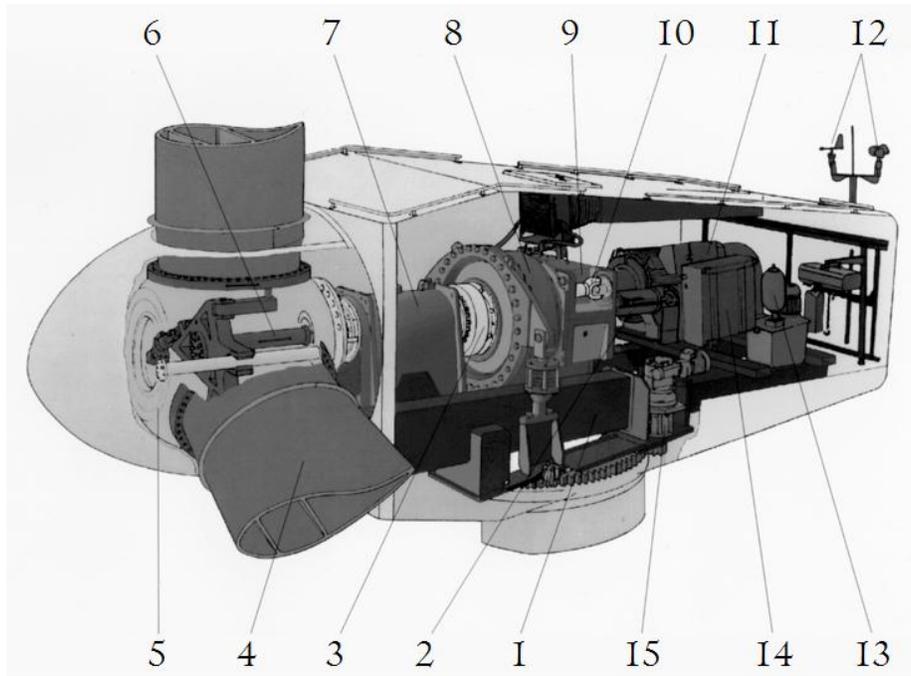


Figura 3.23 La góndola brinda soporte y protección a los elementos contenidos dentro de ella.

(1) Góndola bancada, (2) actuador de paso de las palas, (3) eje del rotor, (4) palas del rotor, (5) buje del rotor, (6) Sistema de control de paso, (7) soporte principal del rotor, (8) caja multiplicadora, (9) freno del rotor, (10) eje del generador, (11) generador, (12) sistema de

Básicamente los elementos contenidos dentro de la góndola son:

- Buje: El buje del rotor se encuentra acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador, su función es unir a las palas con el sistema de rotación, constituye el centro del rotor y en él se fijan las palas.
- Palas: También denominados álabes o aspas. Capturan la energía del viento y la convierten en rotación en el buje.
- Sistema de regulación de potencia: Se ubica insertado entre el rotor y las palas, y regula la potencia absorbida por la turbina, esto para evitar daños en el sistema. Existen dos principios de regulación de potencia, estos son: *regulación por separación de flujo* y *regulación por cambio de paso de la pala*.
- Eje de baja velocidad: Este conecta el buje del rotor a la caja multiplicadora. Posee

conductos del sistema hidráulico para obtener un óptimo funcionamiento de los trenes aerodinámicos. Su velocidad de giro es de 30 a 60 r.p.m.

- Eje de alta velocidad: Permite el funcionamiento del generador eléctrico debido a que la velocidad de giro es aproximadamente de 1,200 a 1,500 r.p.m.

- Caja multiplicadora: Se encuentra rodeada por los ejes de baja y alta velocidad, por lo que aumenta cincuenta veces la velocidad de giro de uno de los ejes (eje de alta velocidad). Posee un sistema de lubricación. El eje principal de la caja multiplicadora tiene una brida para su unión al buje con el empleo de tornillos, se apoya sobre un rodamiento de doble hilera de rodillos en su parte delantera y se une al multiplicador mediante un aro Stüwe de compresión. Sin embargo, en los aerogeneradores multipolo no se presenta, ya que requieren menor velocidad para su funcionamiento (ver figura 3.24).

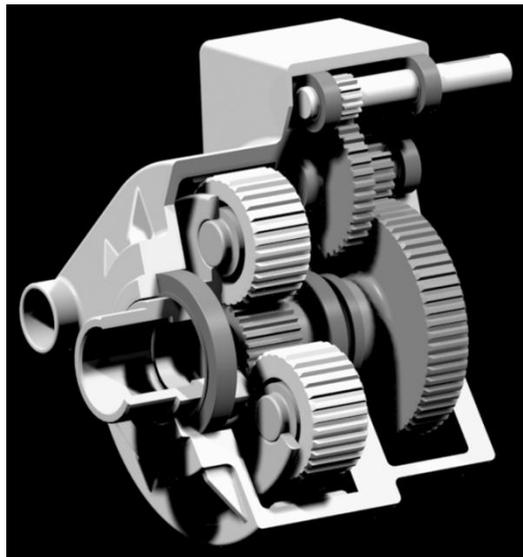


Figura 3.24 Caja multiplicadora estándar para aerogeneradores de gran tamaño.

- Controlador: Normaliza el arranque de la maquinaria a velocidades del viento, las que van desde la conexión (a 3 m/s) y controla la desconexión (a 25 m/s), con el fin de evitar daños al equipo. El control de desconexión ocurre mediante dos procesos:

- Sistema de control de paso: Acciona las palas, haciéndolas rotar, con el fin de reducir el ángulo de ataque y disminuir las fuerzas aerodinámicas bajando la potencia obtenida de la turbina a sólo potencia nominal.

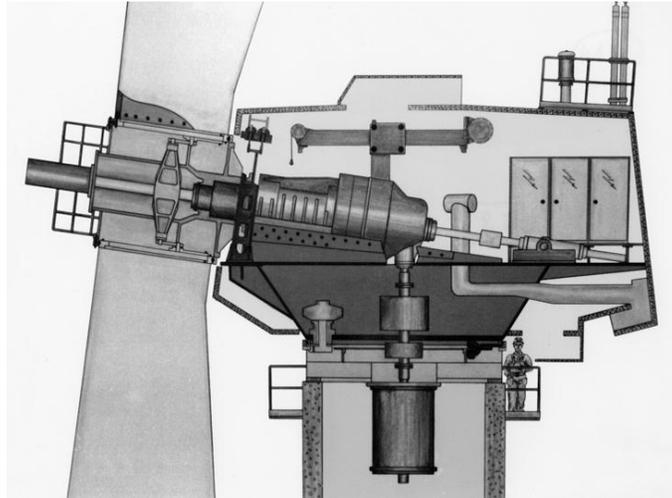
- Control de pérdida: Su función es lograr que la pala entre en pérdida de manera gradual, es decir, con las palas en ángulo de paso fijos y con el perfil optimizado para que el flujo de aire se separe de la pala. Por lo que se pierde sustentación y se incrementa el arrastre.

- Generador eléctrico: Generalmente se trata de un generador asíncrono. En la actualidad, su potencia máxima se encuentra entre los 500 y 1,500 KW. Puede poseer un rotor de velocidad fija o variable (ver figura 3.25 (a)).
 - En el *rotor de velocidad fija* el generador se conecta directamente a la red principal de suministro eléctrico, por lo que resulta económico; sin embargo, presenta altas corrientes de arranque y una alta demanda de potencia reactiva. La energía que se obtiene es de frecuencia variable, por lo que se debe añadir un rectificador y un ondulator para la obtención de ciclos necesarios para la corriente de red.

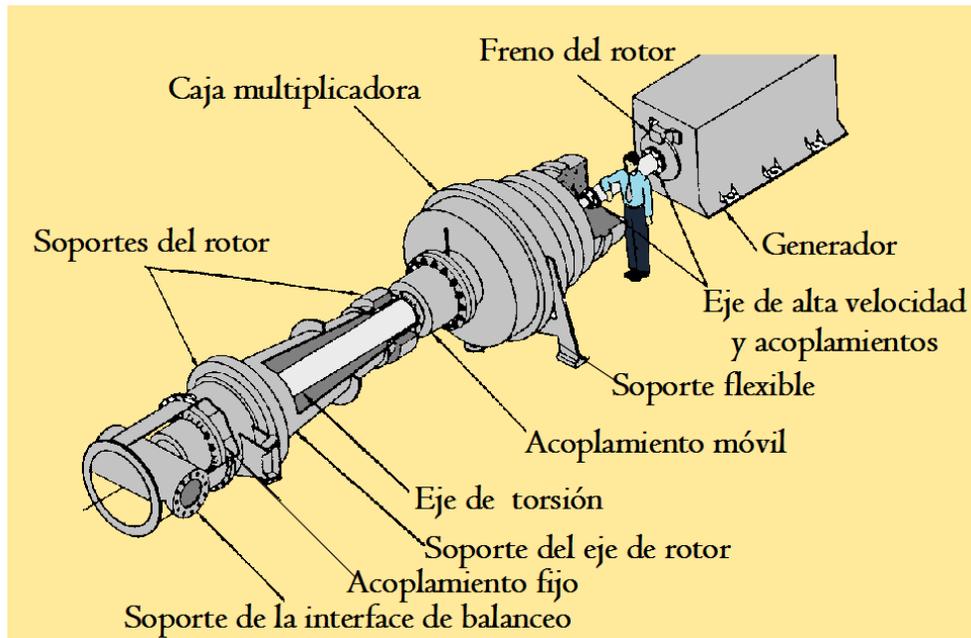
 - En el *rotor de velocidad variable*, el rotor y el generador se desacoplan de la frecuencia de la red, por lo que el rotor es capaz de operar con velocidad variable ajustada a la velocidad de viento real. En consecuencia, los componentes mecánicos reaccionan mejor ante la fatiga y esto permite una ampliación de la vida útil del equipo (ver figura 3.25 (b)).

El generador se conecta a la red a través del empleo de un sistema inversor, o los arrollamientos de excitación del generador son alimentados por una frecuencia externa desde un inversor. El sistema eléctrico se compone por un generador asíncrono con anillos en el rotor donde se puede conectar un cortocircuito, un juego de resistencias o una cascada hipersíncrona. El circuito de cascada hipersíncrona se conforma de un

rectificador trifásico, una reactancia alisadora, una protección de sobreintensidad, un ondulator trifásico, un filtro de armónicos y un transformador, para adaptar la salida de la cascada hipersíncrona a la salida del estator.



(a)



(b)

Figura 3.25 El generador asíncrono del aerogenerador.

- (a) Góndola de la turbina sueca – alemana Aeolus II con el generador en posición vertical,
(b) Eje del rotor de velocidad variable del MOD – 2.

La potencia de salida puede regularse mediante el mecanismo de cambio de paso y con el disparo de los tiristores. El control de estos últimos actúa sobre la corriente del rotor controlando el par, razón por la cual el mecanismo de cambio de paso se adapta a las condiciones variables del viento. El exceso de energía provocado por una ráfaga de viento se traduce de manera instantánea en una aceleración del rotor que devuelve la energía cinética adquirida al sistema en forma de electricidad.

El rotor de velocidad variable tiene la ventaja de reducir las fluctuaciones mecánicas y consigue el mejor ajuste de la velocidad del rotor para operar al máximo de potencia.

- Convertidor: Regula el par que es opuesto por el generador eléctrico a la turbina, regulando su velocidad de giro y de introducirle energía producida por la red. Apoya en la reducción máxima de fluctuaciones de potencia y efecto Flickering, así también opera con velocidad variable del rotor para que el punto de funcionamiento de la turbina sea el de máximo rendimiento.

- Unidad de refrigeración: Su función consiste en el enfriar el generador eléctrico. Contiene una unidad refrigerante por empleada para enfriar el aceite de la caja multiplicadora.

3.5 Clasificación

En la actualidad existe una extensa diversidad de modelos de aerogeneradores, los cuales difieren en cuanto a su tecnología, es decir, en la potencia proporcionada, en el número de palas o por la forma de producción de electricidad. Por lo tanto, pueden clasificarse atendiendo a distintos criterios:

- Por la posición del aerogenerador: Eje vertical y eje horizontal.

- Por la posición del equipo con respecto al viento: A barlovento y a sotavento.
- Por el número de palas: Monopala, bipala, tripala y multipala.

- Por la manera de adecuar la orientación del equipo a la dirección del viento en cada momento.

- Por la forma de producir energía eléctrica: Aplicaciones aisladas y conexión directa a la red.

CAPÍTULO 4.
APLICACIÓN DE LA ENERGÍA
EÓLICA

4.1 Planteamiento del proyecto

La empresa inmobiliaria “El Águila S.A. de C.V.”, dentro de sus planes de expansión, tiene proyectada la realización de un complejo habitacional, integrado por doce casas habitación que se ubicarán en la zona costera del estado de Oaxaca; para ello, en base a la información proporcionada por el “Atlas de Recursos eólicos de Oaxaca” editado por el Departamento Nacional de Energía Renovable a solicitud de la Secretaría de Desarrollo Industrial y Comercial (SEDIC) del Gobierno del Estado, se ha decidido que se realice el proyecto de construcción en la localidad de Santa María Xadani, Oaxaca.

4.2 Ubicación del sitio

El municipio de Santa María Xadani se localiza a 16° 22’ latitud norte, con una longitud oeste de 95° 01’ con una altura de 20 metros sobre el nivel del mar, se encuentra a una distancia de 3 kilómetros de la Laguna Superior. Al norte colinda con Juchitán de Zaragoza, al igual que sus límites al oeste y al este, mientras que al sur colinda con la Laguna Superior y el mar Santa Teresa.

A continuación se presenta la vista satelital de la superficie terrestre del municipio de Santa María Xadani (ver figura 4.1), que pertenece al distrito de Juchitán el cual se ubica al sureste del estado de Oaxaca, en el que existen territorios de bajas elevaciones de terreno en gran parte de la costa sur y la región del Istmo de Tehuantepec. Las elevaciones orográficas predominantes se caracterizan por su baja altitud, la que generalmente se encuentra entre los 1,500 m y 2,200 m.

Se observa que la región característica más dominante del este de Oaxaca, desde una perspectiva eólica, es relativamente el área del Istmo. Debido a que éste divide las cadenas montañosas y se convierte en un canal para el flujo de los vientos del norte, siendo estos ocasionados por intensos gradientes de presión superficial con mayor presión sobre el Golfo de México y menor presión sobre el Océano Pacífico.



Figura 4.1 Localización de Santa María Xadani.

El municipio de Santa María Xadani se localiza dentro de las áreas de mayor concentración de recursos eólicos (ver figura 4.2), donde predominan vientos con velocidad superior a 7.7 m/s. Por ello, para el suministro de energía eléctrica del conjunto habitacional que se pretende construir, se contempla el uso de un aerogenerador, el cual aprovechará la energía cinética de los vientos predominantes de esta zona.

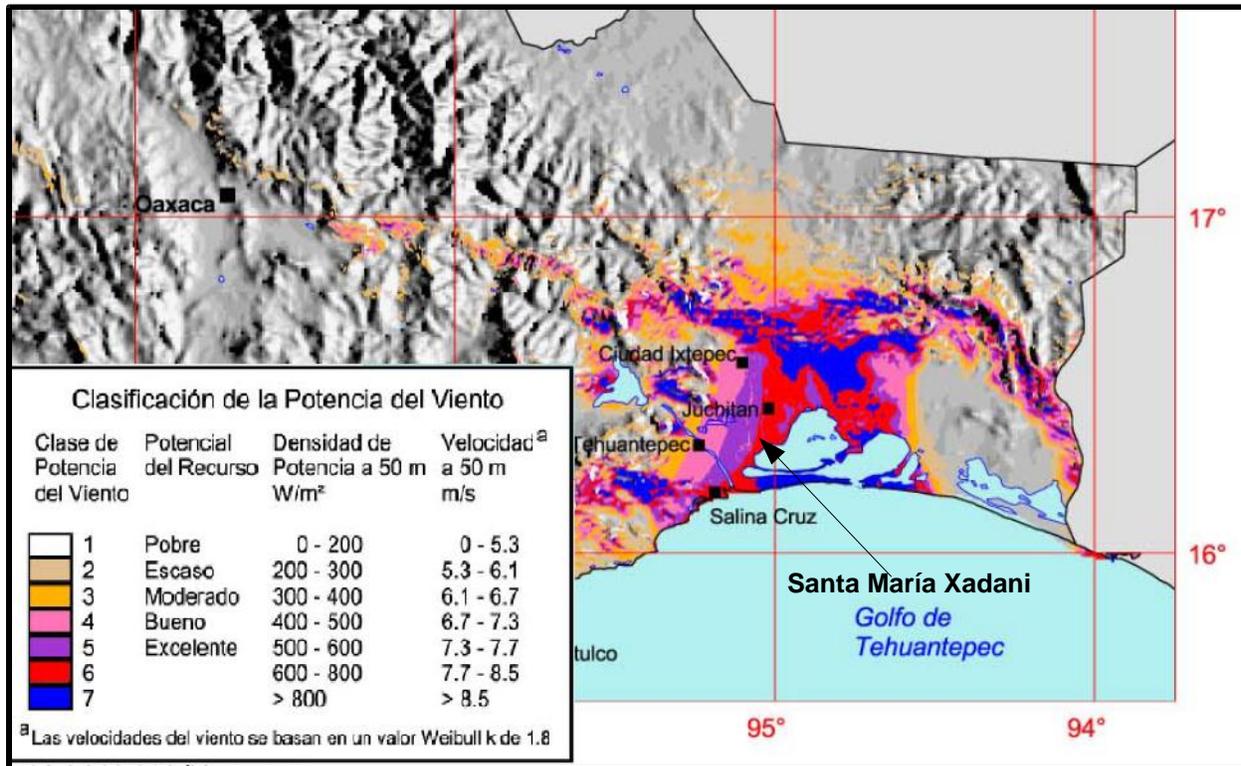


Figura 4.2 Potencia del viento en Santa María Xadani.

4.3 Casa habitación.

En esta sección se describen los aspectos arquitectónicos de la casa habitación, así como su demanda de consumo de energía eléctrica.

Cada edificación tendrá un terreno con un área unitaria de 100.8 m^2 , (incluyendo 72 m^2 de área construida en planta baja, 72 m^2 de área construida en planta alta, así como 28.8 m^2 de jardín y garaje). Los planos del prototipo de la casa habitación se muestran en el anexo A.

Como puede observarse en dicho anexo, la planta baja de la unidad constará de jardín, medio baño, cocina, cuarto de servicio, sala-comedor y garage, mientras que la planta alta se compondrá de dos recámaras, dos baños completos y un cuarto de estudio.

4.3.1 Cálculos eléctricos

Para comenzar el diseño, lo primero que se debe tomar en cuenta es que tipo de carga estará presente en los circuitos derivados y en el alumbrado público del complejo habitacional.

Cargas existentes en cada una de las casas habitación:

- Lámparas de LED marca CONSTRULITA. Modulare II de empotrar dirigible para LED, con balastro electrónico, 127V a 277V. Código: CO1155NBCA. 24 Watts
- Arbotantes de LED marca CONSTRULITA. Arbotante Cubic de LED monocromático con driver electrónico multivoltaje, 127V a 220V. 15 Watts
- Tomacorrientes dobles polarizados marca BTICINO. 180 Watts

Alumbrado público:

- Lámpara de punta de poste de 12 LEDS marca CONSTRULITA, curva tipo II Media, driver electrónico multivoltaje, 127V a 277V. 150 Watts

Una vez establecido lo anterior, se muestran los cálculos para el diseño de la instalación eléctrica, selección de los interruptores termomagnéticos y posteriormente, la elección del aerogenerador; asimismo se presenta el ejemplo del cálculo de la primera fila del cuadro de cargas. (Ver tabla 4.1)

Para comenzar el diseño se establecen los siguientes parámetros:

1. Tensión fase a neutro: $127V \pm 10\%$
2. Factor de potencia: 0.90

Enseguida se calcula el consumo del circuito C-1:

Consumo de las lámparas de LED: 24 W

Consumo de los arbotantes de LED: 15 W

Se multiplica el consumo de cada carga por el número de éstas presentes en el circuito:

$$(24W)(9 \text{ lámparas}) = 216 W$$

$$(15W)(9 \text{ lámparas}) = 135 W$$

Sumando el consumo de las cargas: $216 + 135 = 351 W$

Tomando en consideración la ecuación que determina la potencia real de un circuito de corriente alterna:

$$P = VI \cos \varphi \dots (4.1)$$

Donde:

P: Potencia real en Watts

V: Tensión fase a neutro

I: Corriente

φ : Ángulo de fase entre tensión y corriente

$\cos \varphi$: Factor de potencia

De la ecuación citada anteriormente despejamos el consumo de corriente a plena carga:

$$I = \frac{P}{V \cdot \text{fp}} \dots (4.2)$$

$$I = \frac{351}{(127)(0.90)} = 3.07 A$$

Considerando una corriente nominal del 25% más de la calculada:

$$I_{nom} = (3.07)(1.25) = \mathbf{3.84 A}$$

Tabla 4.1 Cuadro de cargas correspondiente a los circuitos de la casa habitación.

CIRCUITO	TIPO DE CARGA			CONSUMO POR CIRCUITO [W]	TENSIÓN FASE A NEUTRO [V]	FACTOR DE POTENCIA [FP]	CONSUMO DE CORRIENTE A PLENA CARGA [A]	CORRIENTE NOMINAL (1.25%) [A]	INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO
	LÁMPARAS DE LED (24 W)	ARBOTANTES DE LED (15 W)	CONTACTOS (180 VA)						
C-1	9	9		351	127	0.9	3.07	3.84	1 x 15 A
C-2	8	2		222	127	0.9	1.94	2.43	1 x 15 A
C-3			1	180	127	0.9	1.57	1.97	1 x 15 A
C-4			3	540	127	0.9	4.72	5.91	1 x 15 A
C-5			3	540	127	0.9	4.72	5.91	1 x 15 A
C-6			4	720	127	0.9	6.30	7.87	1 x 15 A
C-7			2	360	127	0.9	3.15	3.94	1 x 15 A
C-8			4	720	127	0.9	6.30	7.87	1 x 15 A
C-9			3	540	127	0.9	4.72	5.91	1 x 15 A

Dado que todos los circuitos son monofásicos y tomando en cuenta el resultado anterior, se determina que el interruptor termomagnético que protege adecuadamente este circuito derivado, es de 1 polo por 15 A. El criterio para determinar el valor de los interruptores termomagnéticos es considerando un 50% más de la corriente nominal y ajustando ese valor al inmediato superior de los valores comerciales para dichos interruptores.

En base a los circuitos de alumbrado y tomacorrientes de la casa habitación (todas las cargas), se calcula que la demanda de consumo total es de **4 173** Watts a plena carga.

4.4 Conjunto arquitectónico

El conjunto arquitectónico de los doce condominios horizontales y su iluminación exterior se presenta en el plano correspondiente del anexo A.

4.4.1 Cálculos eléctricos

A continuación se presenta los cuadros de carga que describen la demanda total de energía eléctrica del complejo habitacional. (Ver tablas 4.2 y 4.3)

Tabla 4.2 Consumo total del complejo habitacional.

DESCRIPCIÓN	CONSUMO TOTAL POR UNIDAD [W]	NÚMERO DE UNIDADES	CONSUMO TOTAL DEL COMPLEJO [W]
CASA HABITACIÓN	4173	12	50076
ALUMBRADO PÚBLICO	150	26	3900
DEMANDA TOTAL			53976

Tabla 4.3 Demanda total de consumo del complejo habitacional.

DESCRIPCIÓN	[W]
DEMANDA TOTAL [W]	53976
FACTOR DE SEGURIDAD AL 75% [W]	94458
CAPACIDAD MÍNIMA DEL AEROGENERADOR [kW]	95 kW

4.5 Selección de aerogenerador.

Tomando en cuenta los valores establecidos en el apartado 4.4.1 y considerando un factor de seguridad del 75 %, se empleará el aerogenerador Enercon E33 (ver figura 4.3) que satisface la demanda de consumo. Se utilizará un solo equipo que abastecerá al complejo habitacional.

El aerogenerador Enercon E33 puede funcionar en cualquier nivel de potencia de 5 kW a 330 kW, para poder ser instalados en lugares donde existen limitaciones de la red eléctrica.



Figura 4.3 Aerogenerador Enercon E33.

Después de analizar el proyecto del uso de un aerogenerador para suministrarle energía eléctrica a un complejo habitacional, se puede afirmar que dicho proyecto resulta viable y sin problemas para llevarse a cabo.

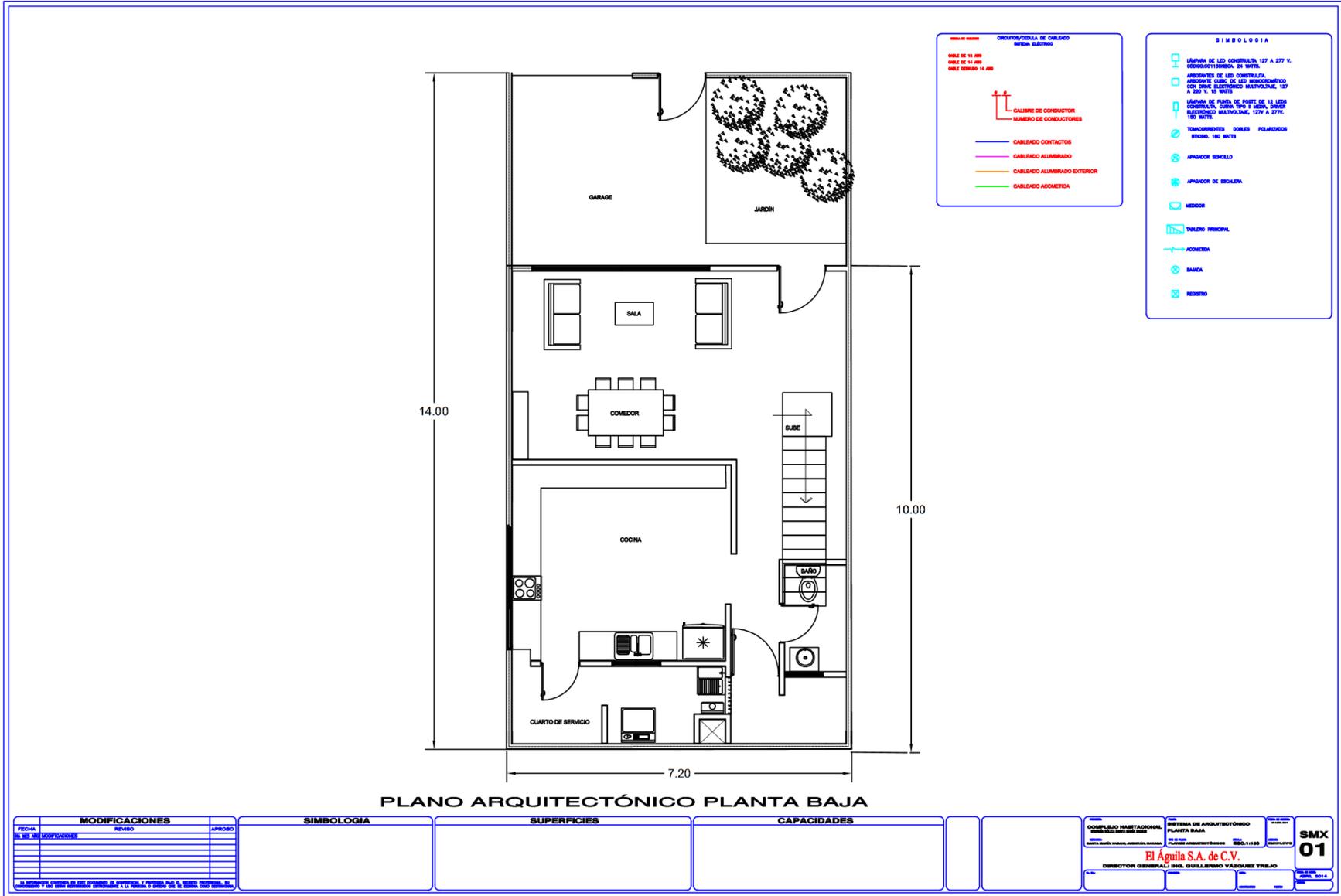
El aerogenerador fue seleccionado para que trabaje como máximo al 25% de su capacidad para no forzarlo cuando el sistema opere a plena carga; con esta medida de seguridad, ninguna de las unidades del complejo se verá privada de electricidad.

Uno de los factores determinantes para decidir emplear energía eólica como generadora de energía eléctrica son las características de la zona geográfica del lugar donde se pretenda hacer la construcción. Lo anterior debido a los requerimientos del aerogenerador, que opera óptimamente con velocidades de viento superiores a 5 m/s.

Queda de manifiesto que existen energías renovables (en este caso la energía eólica), que se pueden utilizar en sustitución a las no renovables, y con este tipo de acciones, se contribuye a la conservación de los recursos naturales del planeta, debido a la reducción de la sobreexplotación de los recursos más utilizados tradicionalmente.

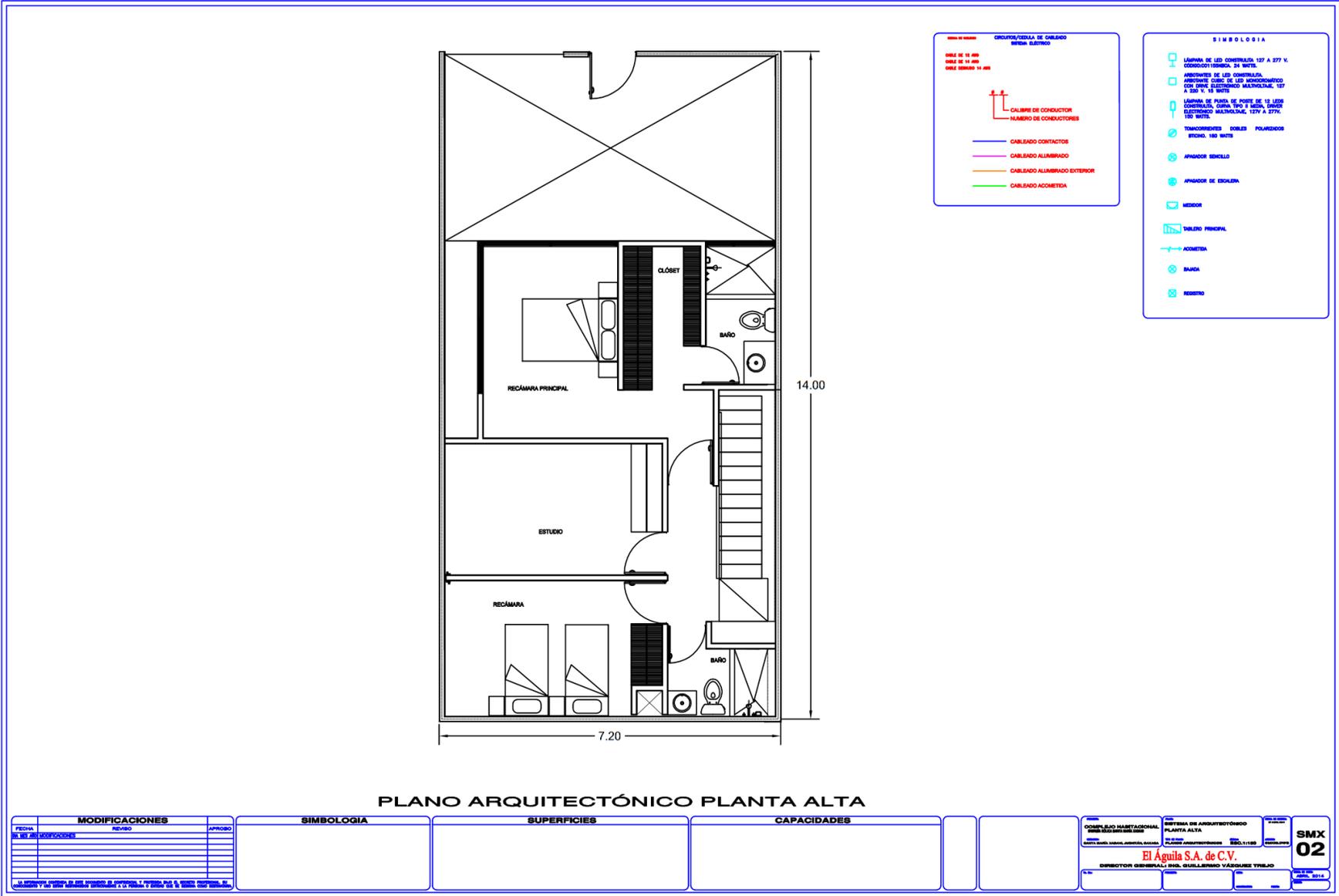
ANEXO A

PLANO ARQUITECTÓNICO PLANTA BAJA

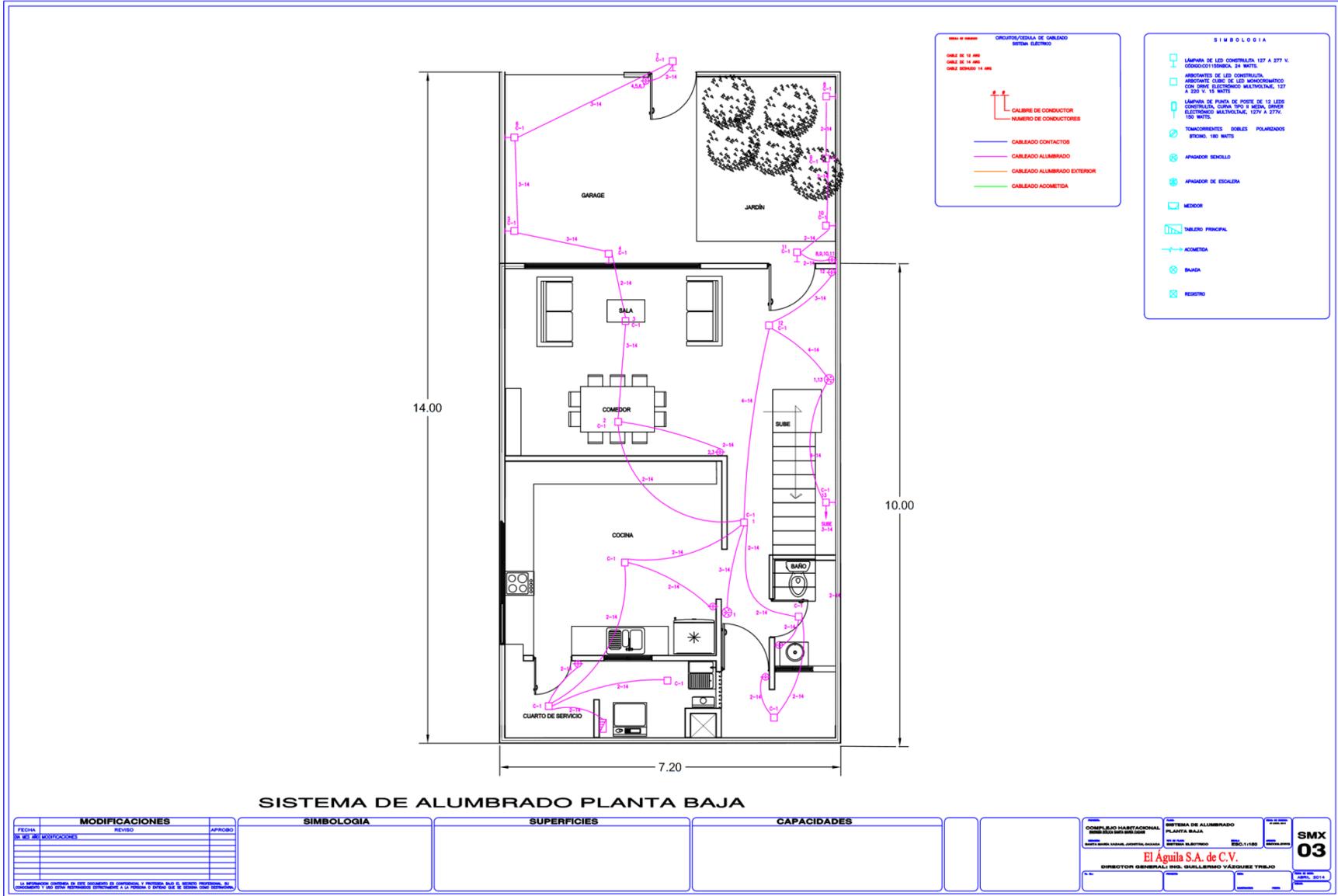


PLANO ARQUITECTÓNICO PLANTA ALTA

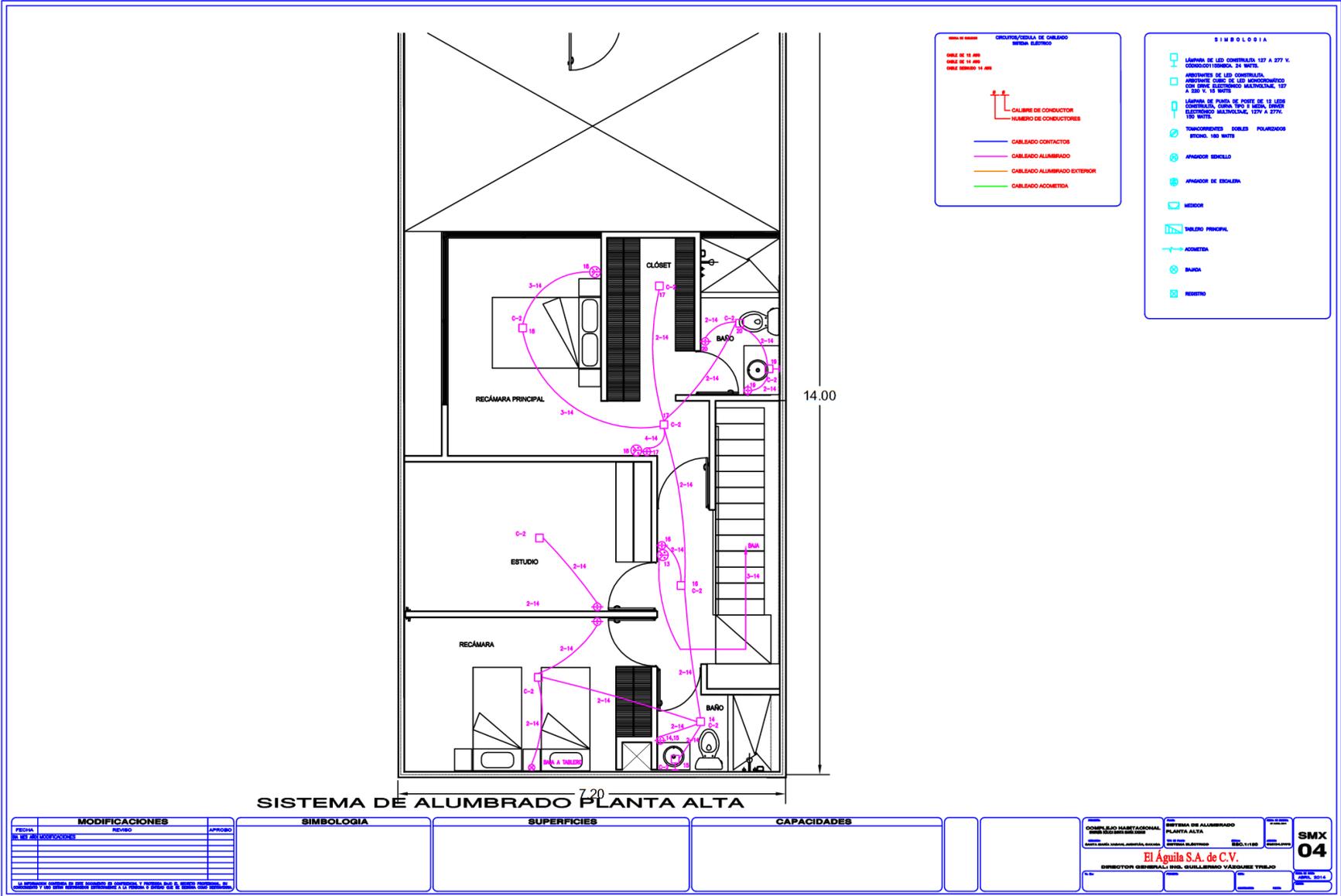
100



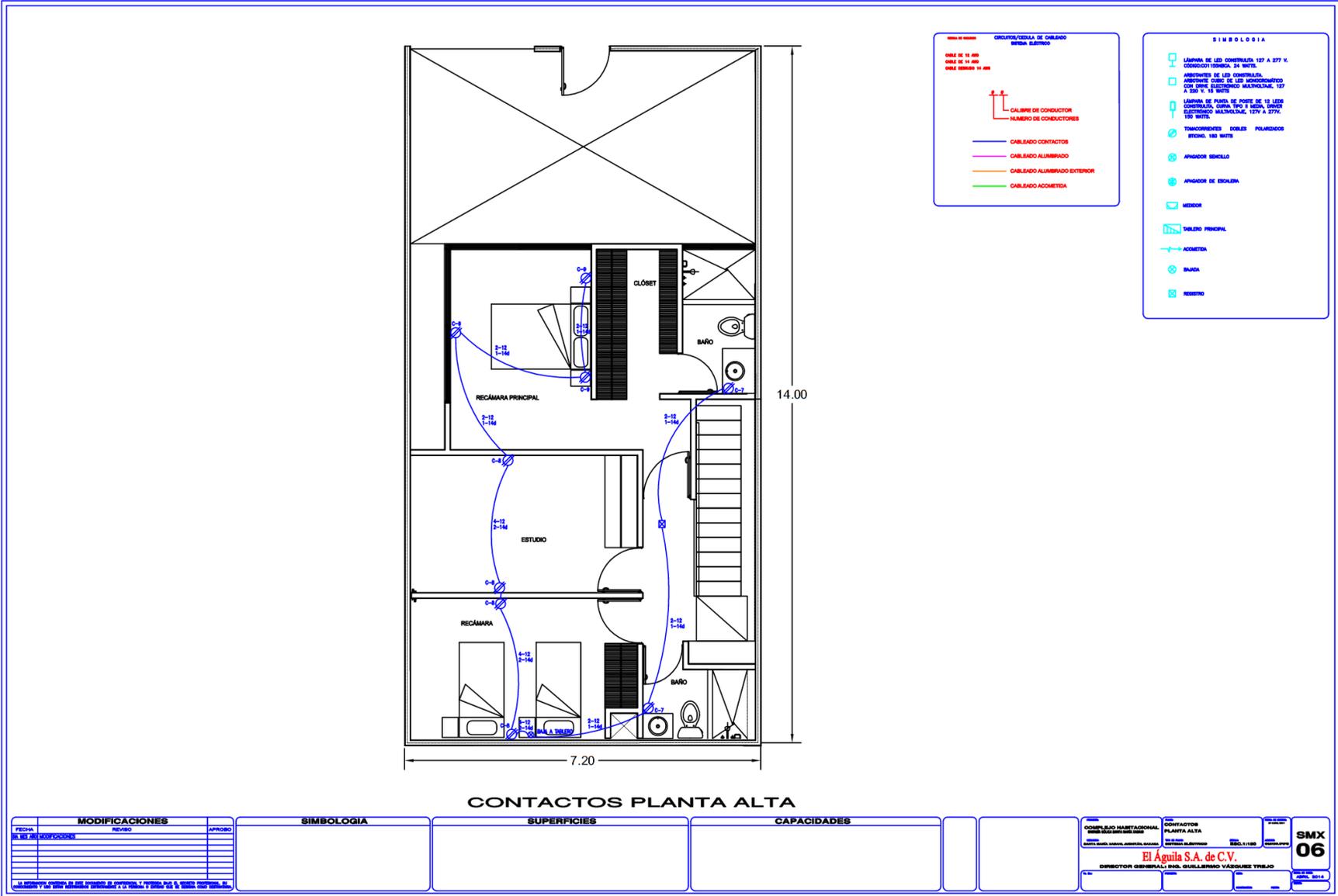
PLANO DE ALUMBRADO PLANTA BAJA

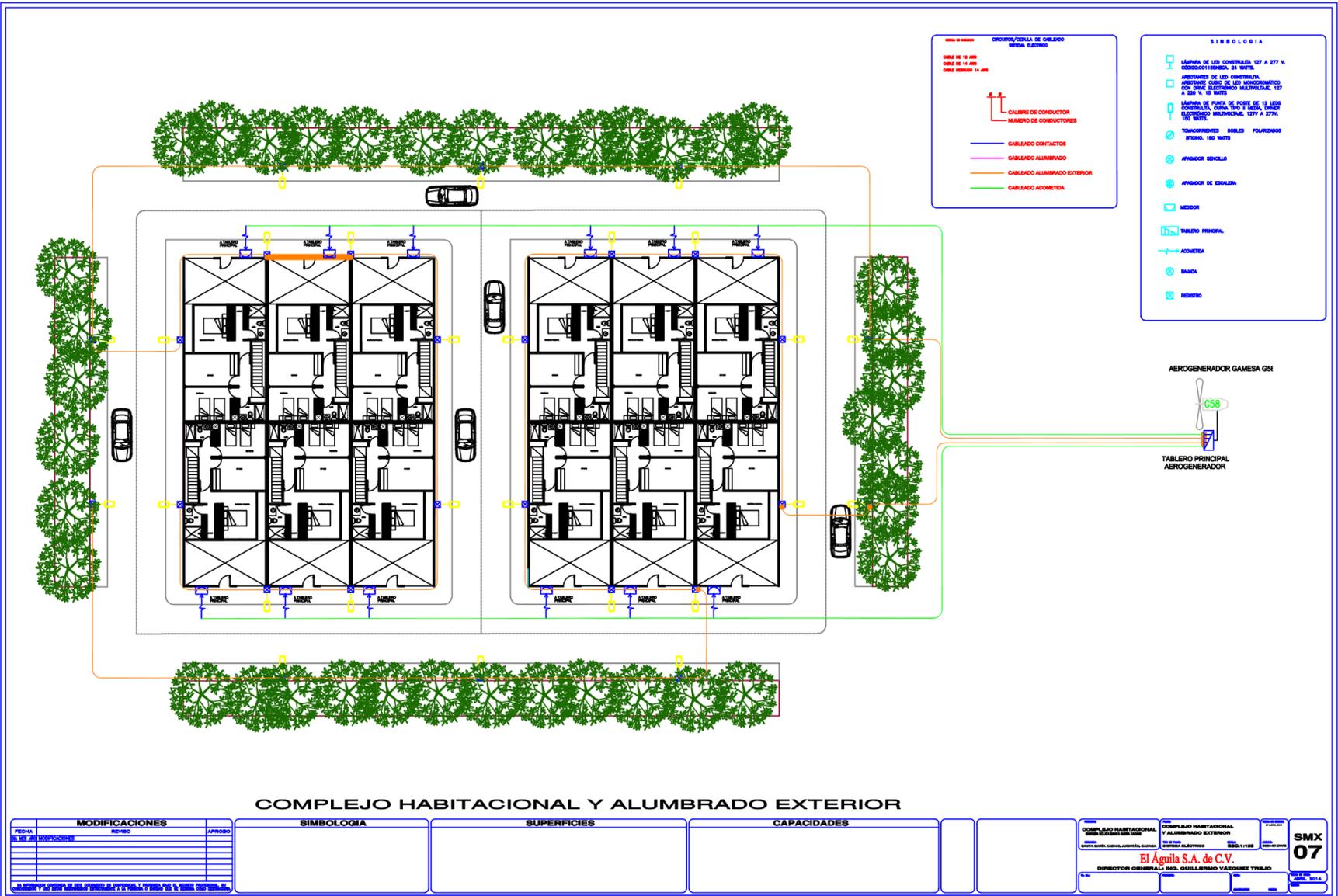


PLANO DE ALUMBRADO PLANTA ALTA



PLANO DE CONTACTOS PLANTA ALTA





ÁREAS DE CABLEADO

CABLEADO/CELDA DE CABLEADO
BANDA ELÉCTRICA

ÁREA DE 10 AM
ÁREA DE 14 AM
ÁREA DE 18 AM

CALIBRE DE CONDUCTOR
NÚMERO DE CONDUCTORES

CABLEADO CONTACTOR
CABLEADO ALUMBRADO
CABLEADO ALUMBRADO EXTERIOR
CABLEADO ACOMETIDA

SIMBOLOGÍA

- LAMPARA DE LED CONTROLADA 127 A 277 V. CONTROL VIBRATA. 24 WATTS
- ARMADURES DE LED CONTROLADA. ARMADURES DE LED ARMONIZADO CON DRIVER ELECTRONICO MULTIVOLTAJE. 127 A 277 V. 18 WATTS
- LAMPARA DE PUNTO DE POSTE DE 18 LEDS CONTROLADA. CABLE 180' Y BANDA. 127V A 277V. 180 WATTS. MULTIVOLTAJE. 127V A 277V. 8 1/2" X 12 WATTS
- TRANSFORMADORES SOBRES POLIESTEROS. 180 WATTS
- APARADOR BENCILLO
- APARADOR DE ESCALA
- MEDIDOR
- TABLERO PRINCIPAL
- ACOMETIDA
- BANDA
- REBENTO

AEROGENERADOR GAMESA G56



COMPLEJO HABITACIONAL Y ALUMBRADO EXTERIOR

MODIFICACIONES		
FECHA	REVISO	APROBO
01/01/2014	MODIFICACIONES	

SIMBOLOGIA

SUPERFICIES

CAPACIDADES

<p>COMPLEJO HABITACIONAL Y ALUMBRADO EXTERIOR</p> <p>El Águila S.A. de C.V.</p> <p>DIRECTOR GENERAL: ING. GUILLERMO VASQUEZ TRILLO</p>	<p>COMPLEJO HABITACIONAL Y ALUMBRADO EXTERIOR</p> <p>SECCION: ELABORACION DE PLANOS</p> <p>SMX 07</p> <p>FECHA: 2014</p>
--	--

ANEXO B

(Última Reforma DOF 09-04-2012)

CAPITULO I. Disposiciones Generales

ARTICULO 3o.- No se considera servicio público:

- I. La generación de energía eléctrica para autoabastecimiento, cogeneración o pequeña producción;
- III. La generación de energía eléctrica para su exportación, derivada de cogeneración, producción independiente y pequeña producción.
- IV. La importación de energía eléctrica por parte de personas físicas o morales, destinada exclusivamente al abastecimiento para usos propios.

ANEXO C

(Última Reforma DOF 30-11-2012)

TÍTULO PRIMERO. Disposiciones generales. Capítulo I. Disposiciones preliminares.

ARTICULO 4o.- La Secretaría promoverá que la utilización de las distintas fuentes de energía para la Generación Renovable se lleve a cabo de conformidad con los siguientes criterios:

- I. Fortalecimiento de la seguridad energética del país, al diversificar las fuentes de energía para la generación eléctrica;
- IV. Fomento en el desarrollo social de las comunidades donde se utilizan o se llevan a cabo los proyectos;
- VII. Reducción en los impactos ambientales y en la salud pública causados por el uso de combustibles de origen fósil;

TÍTULO TERCERO. De las acciones de gobierno para la Generación Renovable. Capítulo II. De las acciones vinculadas al desarrollo social y rural.

Artículo 27º.- La Secretaría promoverá la Generación Renovable como un medio para dar acceso a la energía eléctrica en aquellas comunidades que no cuenten con este servicio, mediante:

- I. Información y asesoría a las comunidades interesadas en proyectos de Generación Renovable, y
- II. Mecanismos de promoción para facilitar la implementación de dichos proyectos.

- Ayuntamiento Municipal de Santa María Xadani 2008-2010. Plan municipal de desarrollo sustentable. Santa María Xadani, octubre 2008.
- ELLIOT, D. Atlas de Recursos Eólicos del Estado de Oaxaca. Laboratorio General de Energía Renovable. México 2004.
- HERNÁNDEZ, González Omar Agustín. Potencial del Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. Universidad Nacional de los Valles Centrales de Oaxaca. Ciudad Juárez, Chihuahua, Diciembre 2009.
- LAVÍN Miguel. Oceanografía y Meteorología del Golfo de Tehuantepec. CICESE. Geos Vol. 25. No. 1, México, Noviembre 2005.
- Política Nacional de Mares y Costas de México. Gestión Integral de las Regiones más dinámicas del territorio Nacional. Propuesta de la Comisión Intersecretarial para el Manejo Sustentable de Mares y Costas (CIMARES). Versión 2011.
- GABRIEL, Morales Josefina. Crecimiento poblacional e instrumentos para la regulación ambiental de los asentamientos humanos en los municipios costeros de México. Gaceta Ecológica, número 079. Instituto Nacional de Ecología. Distrito Federal, México 2006.
- DÍEZ, Pedro Fernández. Energía Eólica. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. España.
- DUTRA, Ricardo. Energía Eólica, Principios y Tecnologías. Cepel Sistema Eletrobrás
- WAGNER, Hermann-Josef. Introduction to Wind Energy Systems Basics, Technology and Operation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Alemania 2009.

- LA CAL HERRERA, José A. La Energía Eólica en Sierra Mágina. Sumuntán No. 23. España, 2006.

- MANWELL, J.F. Wind Energy Explained, Theory, Design and Application. John Wiley & Sons Ltd. 2a. Ed. Inglaterra 2009.

- ACKERMANN, Thomas. Wind Power in Power Systems. John Wiley & Sons. Inglaterra 2005.

- PASQUALETTI, Martin J. Wind Power in View Energy Landscapes in a crowded world. Academic Press. Estados Unidos 2002.

- BURTON, Tony. WIND ENERGY HANDBOOK. John Wiley & Sons. Inglaterra 2001.

- BIANCHI, Fernando D. Wind Turbine Control Systems, Principles, Modelling and Gain Scheduling Design. Springer-Verlag, Inglaterra 2007.

- HANSEN, Martin O. L. Aerodynamics of Wind Turbines. Earthscan 2a. Ed., Inglaterra 2008.

- PATEL, Mukund R. Wind and Solar Power Systems. CRC Press, Estados Unidos 1999.

- Guía para la Utilización de la Energía Eólica para Generación de Energía Eléctrica. Unidad de Planeación Minero Energética. Colombia 2003.