

## **Análisis técnico económico para la instalación de un aerogenerador en sector residencial**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**

Facultad de Ciencias y Humanidades  
**Departamento de Ingeniería Mecánica**

**Análisis técnico económico para la instalación de un  
aerogenerador en sector residencial**

BIBLIOTECA  
DE LA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

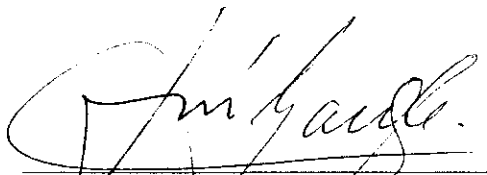
Trabajo de investigación presentado para optar al grado académico de  
Licenciatura en Ingeniería Mecánica


Por  
**Edgar Renato González Díaz**

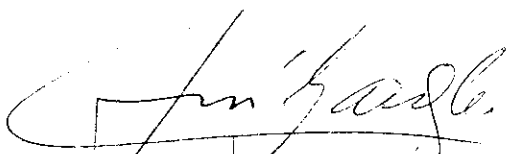
Guatemala  
2002

Vo. Bo.: Ing. Sigurd Møklebust

Terna Examinadora

  
Ingeniero José Joaquín Garoz

  
Ingeniero Carlos Paredes

  
(por) Ingeniero Sigurd Møklebust, que en paz descansa.

Fecha de aprobación: Guatemala 19 de junio del 2002

## Agradecimientos

A papá, que sin ti hubiera sido imposible, tu apoyo, consejos y ejemplo fueron indispensables.

A mamá, siempre presente, siempre confiando en mi y ante todo siempre queriéndome.

A mi hermano Dani, por ser mi mejor amigo.

A mis amigos y seres más queridos, por existir y ser lo que son.

Y a la vida !

# ÍNDICE

	Página
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE GRÁFICAS	x
LISTA DE ILUSTRACIONES	xi
RESUMEN	xii
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. HISTORIA DE LOS AEROGENERADORES	3
III. RECURSOS EÓLICOS	5
3.1. Origen de la energía eólica	5
3.2. Vientos	5
3.2.1. Vientos geostróficos	5
3.2.2. Vientos locales	6
3.2.2.1. Brisas marinas y terrestres	6
3.2.2.2. Vientos de montaña	6
3.3. Rugosidad y cizallamiento del viento	7
3.3.1. Rugosidad	7
3.3.2. Cizallamiento del viento	9
3.4. Variabilidad de la velocidad del viento	9
3.5. Turbulencia	10
3.6. Obstáculos al viento	10
3.6.1. Resguardo tras los obstáculos	11
3.6.2. Efecto de estela	11
3.6.3. Efecto túnel	11
3.7. Selección del emplazamiento de un aerogenerador	12
IV. CÁLCULO DE POTENCIA	13
4.1. Medición de la velocidad del viento	13
4.2. La energía del viento	14
4.2.1. Densidad del aire	14
4.2.2. Área de barrido del rotor	14
4.3. Potencia y energía del viento	14
4.4. Distribución de Weibull	16
4.4.1. Potencia media ponderada	17

4.5.	Ley de Betz	18
4.5.1.	El tubo de corriente	18
4.5.2.	Distribución de la presión del aire	18
4.5.3.	La ley de Betz	18
4.5.3.1.	Demostración de la ley de Betz	19
4.6.	Curva de potencia de un aerogenerador	20
4.7.	Coeficiente de potencia	21
V.	FUNCIONAMIENTO DE UN AEROGENERADOR	22
5.1.	Aerodinámica de aerogeneradores	22
5.1.1.	Palas del rotor	22
5.1.1.1.	Pérdida de sustentación	23
5.1.1.2.	Dirección de la sustentación	23
5.2.	Componentes	24
5.2.1.	Aspas del rotor	24
5.2.2.	Generador	24
5.2.3.	Reguladores y controladores electrónicos	24
5.2.4.	Cola de orientación	25
5.2.5.	La torre	25
5.2.6.	Baterías	25
5.2.7.	Cables y sus dimensiones	26
5.3.	Control de potencia	26
5.3.1.	Regulación por variación de área de captación	27
5.3.2.	Regulación por pérdida aerodinámica	27
VI.	GEOGRAFÍA DEL SECTOR B-1 DE CIUDAD SAN CRISTÓBAL	29
6.1.	Localización de la zona de estudio	29
6.2.	Fotografías y mapas de la zona	30
6.2.1.	Fotografías	30
6.2.2.	Mapas	32
VII.	CONDICIONES EÓLICAS	34
VIII.	ELECCIÓN DE EL AEROGENERADOR SEGÚN ASPECTOS ECONÓMICOS	35
8.1.	Aerogeneradores del mercado local	35
8.2.	Generación y eficiencia de los aerogeneradores	36
8.3.	Análisis económico	37
8.3.1.	Precio del kWh de la compañía eléctrica	37
8.3.2.	Tasa de interés	38

8.3.3. Precios y vida útil del sistema	38
8.3.4. Relación costo beneficio	40
IX. CONSIDERACIONES ADICIONALES AL USO DE ENERGÍA EÓLICA	42
X. CONCLUSIONES	45
XI. BIBLIOGRAFÍA	46
ANEXO I.	47

## LISTA DE TABLAS

Tabla	página
1. Direcciones del viento dominante	6
2. Escala Beaufort de velocidades de viento	7
3. Clases y longitudes de rugosidad	8
4. Calibre de cable a utilizar	26
5. Características geográficas generales de la zona de estudio	29
6. Velocidades del viento en la zona señalizada por color	34
7. Potencia teórica del viento	34
8. Modelos de aerogeneradores disponibles	35
9. Cuotas en US\$ / kWh	37
10. Precios de componentes para instalación de sistema eólico	38
11. Valor de anualidad para cada modelo	38
12. Generación mensual según velocidad de viento promedio para cada modelo (kWh / mes)	39
13. Precio del kWh producido por cada modelo	39
14. Comparación monetaria entre sistema eólica y fotovoltaico	41

# LISTA DE GRÁFICAS

Gráficas	página
1. Cizallamiento del viento	9
2. Densidad de potencia eólica	15
3. Distribución de Weibull	16
4. Aproximación del factor de k de la f.d.p. de Weibull	17
5. Curva de relación de potencia comparada con relación de velocidad	20
6. Curva de potencia de un aerogenerador de 1 kWh	20
7. Curva de coeficiente de potencia	21
8. Comparación de generación entre aerogeneradores	36
9. Comparación de eficiencias entre aerogeneradores	36
10. Generación mensual estimada	37
11. Relación beneficio costo	40

## LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración	página
1. Primer turbina eólica automática para generación de electricidad	3
2. Aerogenerador Gedser de 200 kW	3
3. Aerogenerador Bonus de 30 kW	4
4. Parque eólico Middelgrunden de Dinamarca	4
5. Imagen infrarroja de la superficie del mar	5
6. Direcciones del viento dominantes según latitud y dirección	6
7. Fluctuaciones en la velocidad del viento	10
8. Turbulencia alrededor de un obstáculo	10
9. Indicador de viento dominante	12
10. Anemómetro de cazoletas	13
11. Velela de papel o plástico	13
12. Tubo de corriente	18
13. Distribución de la presión del aire	18
14. Sustentación	22
15. Dirección de sustentación 1	23
16. Dirección de sustentación 2	23
17. Aspas del rotor	24
18. Motor eléctrico	24
19. Aerogenerador H-80	25
20. Aerogenerador 403 seccionado	25
21. Sistema Furling de regulación por variación de área de captación	27
22. Mapa de Ciudad San Cristóbal	32
23. Mapa 1 de zona de estudio	32
24. Mapa 2 de zona de estudio	32

## RESUMEN

Esta tesis está dirigida a proporcionar información para la aplicación de mejores recursos alternativos, económicos y ecológicos que satisfagan las necesidades de las diferentes regiones de Guatemala, en particular, el aprovechamiento del recurso eólico residencial.

La energía eléctrica en Guatemala tiene varias fuentes, desde hidroeléctricas, hasta generadores de energía por medio de turbinas de vapor. Todas produciendo en el orden de los Megavatios y contribuyendo al desequilibrio ambiental.

Este trabajo se enfoca en el aprovechamiento de un recurso inagotable, el eólico. Para obtener el mayor beneficio tanto en el aspecto energético como en el económico, es necesaria conocer las condiciones geográficas de determinado lugar, en este caso el sector B1 de Ciudad San Cristóbal, zona 8 de Mixco de la ciudad de Guatemala.

Fue necesario estudiar los fundamentos teóricos e históricos para comprender y utilizar la información recolectada con el fin de optimizar el recurso eólico. Al hacer el estudio de campo se dedujo que existían algunos lugares con mayor potencial eólico debido a que estaban situados en lugares donde la velocidad del viento era mayor y más estable.

Al hacer un análisis económico se comprobó que la utilización de aerogeneradores era rentable en ciertos lugares del sector estudiado y que, para esas condiciones, era más eficiente que el uso de paneles solares.

# I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en Guatemala no se cubre la demanda de potencia requerida, la energía que se ha producido hasta el momento ha implicado repercusiones negativas sobre el medio ambiente. La escasez de energía eléctrica afecta mayormente al área rural del país, en donde organizaciones no gubernamentales invierten en instalaciones de generación renovable, principalmente la fotovoltaica, la cual tiene un fácil mantenimiento pero su costo es muy elevado para la potencia que genera.

Existe una alternativa de fácil alcance en el país, la energía eólica absorbida por aerogeneradores residenciales, es decir de potencias bajas, pero suficientes para las demandas de una familia o pequeñas comunidades. La instalación de aerogeneradores no se limita a sectores donde la energía eléctrica no existe, también es una opción para zonas urbanas que estén interesadas en un beneficio económico y ecológica para ellas.

La inversión inicial en aerogeneradores es relativamente alta, mayor que la conexión a la red eléctrica, pero a mediano o largo plazo puede ser ventajosa, siempre y cuando exista el elemento único indispensable, el viento. La finalidad de esta tesis es comprobar si es rentable adquirir un sistema eólico en un sector residencial, comparado con los precios de la compañía eléctrica.

Entiéndase por energía eólica aquella que tiene el aire en movimiento, y que con el fin de aprovecharla y transformarla en energía eléctrica, el hombre ha ideado la forma de captarla por medio del impacto aerodinámico entre el viento y componentes rotatorios, hélices. Debido a esto la efectividad de los sistemas están sujetos a la densidad del viento, su velocidad y al área que somos capaces de captar. Por lo que el estudio de ubicación es sumamente importante, para maximizar el potencial del aerogenerador.

Los fundamentos de la energía eólica se transmiten en esta tesis de forma concreta. Es necesario estudiar los conceptos teóricos, para comprender y escoger una buena localidad y el aerogenerador más indicado. Para la selección del emplazamiento se comenzó por simple observación; es posible sentir el viento o ya bien ver qué efectos ha tenido el viento en la naturaleza. Y partiendo de aquí se hace un análisis más detallado de las velocidades del viento promedio.

La elaboración del análisis económico es fundamental, ya que es necesario comprobar si la inversión que implica la instalación de un aerogenerador residencial no conlleva consecuencias negativas a la economía del proyecto.

En el caso particular de el sector B-1 de Ciudad San Cristóbal, luego de comparar los diferentes regímenes de viento en la zona y las distintas opciones de aerogeneradores disponibles en el mercado, se logró graficar las tabulaciones para identificar cuál es la mejor opción dependiendo de cada caso en particular. Esto se refiere a que tanto las tablas como las gráficas muestran toda la información necesaria para escoger un aerogenerador, no importando qué tipo de consumo tenga cada interesado ya que los datos están basados en distintos valores de velocidades de viento.

Se comprobó que existe factibilidad de instalar aerogeneradores en la zona de estudio y que en varios lugares estos implican tanto ahorro monetario, como energético a mediano y largo plazo. También se comparó el potencial eólico con el fotovoltaico con respecto a los costos de los artefactos y se concluyó que el sistema eólico en la zona, más eficiente.

## II. HISTORIA DE LOS AEROGENERADORES

En el siglo V a.C. se encuentran los primeros aeromotores en Asia: son máquinas de eje vertical iguales a las denominadas *panemonas* de algunas islas griegas. Más o menos por la misma época, en Egipto se utilizaban molinos de eje vertical para moler grano y bombear agua, también en la zona de Sijistán, entre Irán y Afganistán. Todos estos molinos tenían el mismo principio: transformar la energía eólica en energía para el bombeo de agua y la molturación del grano entre otras.

En el siglo VII d.C. se da origen a los primeros modelos rústicos de los clásicos molinos holandeses que hoy en día son mecánicamente sofisticados. O los aeromotores para el bombeo de agua que progresa con la invención de las multipalas en 1870 por los americanos.

Durante el invierno de 1887-88 Charles F. Brush construyó la que hoy se cree es la primera turbina eólica de funcionamiento automático para generación de electricidad. Era un gigante, la más grande del mundo con un diámetro de rotor de 17 m y 144 palas fabricadas en madera de cedro. La turbina funcionó durante 20 años y cargó las baterías en el sótano de su mansión. A pesar del tamaño de la turbina, el generador era solamente un modelo de 12 kilovatios (kW).

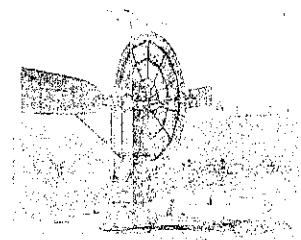


Ilustración 1

Poul la Cour (1846-1908), que tuvo originalmente una formación como meteorólogo, fue el pionero de las modernas turbinas eólicas generadoras de electricidad. Poul la Cour fue uno de los pioneros de la moderna aerodinámica, y construyó su propio túnel de viento para realizar experimentos.

La Cour fundó la "Society of Wind Electricians", que en 1905, un año después de su fundación, contaba con 356 miembros.

El ingeniero Johannes Juul fue uno de los primeros alumnos de Poul la Cour en sus cursos para "electricistas eólicos" en 1904. En los años 50, J. Juul llegó a ser un pionero en el desarrollo de los primeros aerogeneradores en el mundo de corriente alterna.

El innovador aerogenerador de Gedser de 200 kW fue construido en 1956-57 por J. Juul para la compañía eléctrica SEAS en la costa de Gedser, en la parte sur de Dinamarca.

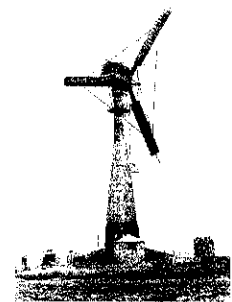


Ilustración 2

La turbina tripala con rotor a barlovento, con orientación electromecánica y un generador asíncrono fue un diseño pionero de los modernos aerogeneradores, aunque su rotor con cables de acero parezca actualmente algo pasado de moda. La turbina disponía de regulación por pérdida aerodinámica, y J. Juul inventó los frenos aerodinámicos de emergencia en punta de pala, que se sueltan por la fuerza centrífuga en caso de sobrevelocidad. Básicamente, el mismo sistema es hoy en día utilizado en las modernas turbinas de regulación por pérdida aerodinámica. La turbina, que durante muchos años fue la más grande del mundo, fue increíblemente duradera. Funcionó durante 11 años sin mantenimiento.

Hacia el año 1920 la energía eólica obtiene cierto éxito, pues había trescientos constructores de estos aparatos. El estudio en los campos de la aerodinámica permitió alcanzar enormes progresos en los aeromotores, esto hasta el año 1961; desgraciadamente en ese año el precio del petróleo bajó, poniendo al kilovatio "eólico" a precios inaccesibles. Todas las máquinas fueron desmontadas y vendidas al precio de chatarra.

La máquina Bonus 30 kW, que se observa en la ilustración 3, fabricada desde 1980, es un ejemplo de uno de los primeros modelos de los fabricantes actuales. El diseño básico de estas máquinas se desarrolló mucho más en las siguientes generaciones de aerogeneradores.



Ilustración 3

Literalmente miles de máquinas fueron instaladas en el programa eólico de California a principios de los 80. La Micon de 55 kW es un ejemplo de tales máquinas, instalada en un enorme parque eólico de más de 1.000 máquinas en Palm Springs.

El mercado de energía eólica en Estados Unidos desapareció de la noche a la mañana con la desaparición de los esquemas de apoyo californianos alrededor de 1985. Desde entonces, sólo unas pocas nuevas instalaciones han sido puestas en servicio, aunque finalmente el mercado parece haberse recuperado. Alemania es ahora el principal mercado mundial, y el país con la mayor potencia eólica instalada.

El mayor parque eólico de Dinamarca es el de Middelgrunden, que es también el mayor parque eólico marítimo del mundo. Consta de 20 aerogeneradores Bonus de 2 megavatios (MW) cada uno, sumando una potencia total de 40 MW.



Ilustración 4

## III. RECURSOS EÓLICOS

### 3.1. Origen de la energía eólica

Todas las fuentes de energía renovables (excepto la marematriz y la geotérmica), e incluso la energía de los combustibles fósiles, provienen, en último término, del sol. El sol irradia 100.000.000.000.000 kWh de energía hacia la Tierra. En otras palabras, la Tierra recibe  $10^{17}$  vatios (W) de potencia. Alrededor de 1 a 2 por ciento de la energía proveniente del sol es convertida en energía eólica. Esto supone una energía alrededor de 50 a 100 veces superior a la convertida en biomasa por todas las plantas de la tierra.

Las regiones alrededor del ecuador, a  $0^\circ$  de latitud, son calentadas por el sol más que las zonas del resto del globo. Estas áreas calientes están indicadas en colores cálidos, rojo, naranja y amarillo, en la ilustración 5 de rayos infrarrojos de la superficie del mar (tomada de un satélite de la NASA, NOAA-7, en julio de 1984).



Ilustración 5

El aire caliente es más ligero que el aire frío, por lo que subirá hasta alcanzar una altura aproximada de 10 km y se extenderá hacia el norte y hacia el sur. Si el globo no rotase, el aire simplemente llegaría al Polo Norte y al Polo Sur, para posteriormente descender y volver al ecuador.

### 3.2. Vientos

#### 3.2.1. Vientos geostróficos

Los vientos geostróficos son generados, principalmente, por las diferencias de temperatura, así como por las de presión, y apenas son influidos por la superficie de la tierra. Los vientos geostróficos se encuentran a una altura de 1,000 metros (m) a partir del nivel del suelo.

El viento sube desde el ecuador y se desplaza hacia el norte y hacia el sur en las capas más altas de la atmósfera. Alrededor de los  $30^\circ$  de latitud en ambos hemisferios la fuerza de Coriolis evita que el viento se desplace más allá. En esa latitud se encuentra un área de altas presiones, por lo que el aire empieza a descender de nuevo. Cuando el viento suba desde el ecuador habrá un área de bajas presiones cerca del nivel del suelo atrayendo los vientos del norte y del sur. En los polos, habrá altas presiones debido al aire frío. Teniendo en mente la fuerza de curvatura de la fuerza de Coriolis, obtenemos los siguientes resultados generales de las direcciones del viento dominantes:

Tabla 1. Direcciones del viento dominantes

	N	N	N	S	S	S
Latitud	90°-60°	60°-30°	30°-0°	0°-30°	30°-60°	60°-90°
Dirección	SO	NE	SO	NO	SE	NO

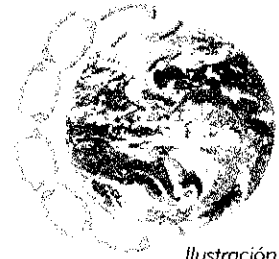


Ilustración 6

Los vientos están mucho más influidos por la superficie terrestre a altitudes de hasta 100 m. El viento es frenado por la rugosidad de la superficie de la tierra y por los obstáculos, como veremos seguidamente. Las direcciones del viento cerca de la superficie serán ligeramente diferentes de las de los vientos geostroficados debido a la rotación de la tierra. Tratándose de energía eólica interesará conocer los vientos de superficie y cómo calcular la energía aprovechable del viento.

### 3.2.2. Vientos Locales

#### 3.2.2.1. Brisas marinas y terrestres

Durante el día la tierra se calienta más rápidamente que el mar por efecto del sol. El aire sube, circula hacia el mar, y crea una depresión a nivel del suelo que atrae el aire frío del mar. Esto es lo que se llama brisa marina.

A menudo hay un periodo de calma al anochecer, cuando las temperaturas del suelo y del mar se igualan. Durante la noche los vientos soplan en sentido contrario. Normalmente, durante la noche la brisa terrestre tiene velocidades inferiores, debido a que la diferencia de temperaturas entre la tierra y el mar es más pequeña. El conocido monzón del sureste asiático es, en realidad, una forma a gran escala de la brisa marina y la brisa terrestre, variando su dirección según la estación, debido a que la tierra se calienta o enfría más rápidamente que el mar.

#### 3.2.2.2. Vientos de montaña.

Las regiones montañosas muestran modelos de clima muy interesantes. Un ejemplo es el viento del valle que se origina en las laderas que dan al sur (o en las que dan al norte en el hemisferio sur). Cuando las laderas y el aire próximo a ellas están calientes la densidad del aire disminuye, y el aire asciende hasta la cima siguiendo la superficie de la ladera. Durante la noche la dirección del viento se invierte, convirtiéndose en un viento que fluye ladera abajo. Si el fondo del valle está inclinado, el aire puede ascender y descender por el valle este efecto es conocido como viento de cañón.

**Tabla 2**  
**Escala de velocidades de viento**

Vel. de viento a 10 m de altura m/s	Escala Beaufort (anticuada)	Viento
0.0 - 0.4	0 El humo sube en vertical	Calma
0.4 - 1.8	1 El humo indica la dirección del viento, pero no la veleta	
1.8 - 3.6	2 Sensible a la cara, mueve hojas de árboles y la veleta	Ligero
3.6 - 5.8	3 Mueve hojas y tallos, despliega banderas poco pesadas	
5.8 - 8.5	4 Levanta polvo y papeles, mueve ramas pequeñas	Moderado
8.5 - 11	5 Mueve arbustos, forma cristerjas pequeñas de olas en lagos	Fresco
11 - 14	6 Mueve ramas grandes, silban los alambres de electricidad	Fuerte
14 - 17	7 Mueve todo el árbol	
17 - 21	8 Rompe las ramas de los árboles, resistencia al caminar	Temporal
21 - 25	9 Daños a edificios ligeros, derriba chimeneas	
25 - 29	10 Arranca árboles, daños considerables en los edificios	Fuerte temporal
29 - 34	11 Muy raro, daños intensos generales	
>34	12	Huracán

### 3.3. Rugosidad y cizallamiento del viento

A una gran altura de la superficie del suelo, alrededor de 1 kilómetro (km), la superficie terrestre apenas ejerce influencia alguna sobre el viento. Sin embargo, en las capas más bajas de la atmósfera, las velocidades del viento se ven afectadas por la fricción con la superficie terrestre. En la industria eólica se distingue entre rugosidad del terreno, la influencia de los obstáculos, y la influencia del contorno del terreno, también llamada orografía del área.

#### 3.3.1. Rugosidad

En general, cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno, mayor será la disminución de velocidad que experimente el viento. Obviamente, los bosques y las grandes ciudades disminuyen mucho la velocidad del viento, mientras que las pistas de hormigón de los aeropuertos sólo la disminuyen ligeramente. Las superficies de agua son incluso más lisas que las pistas de hormigón, y tendrán por tanto menos influencia sobre el viento, mientras que la hierba alta y los arbustos retienen el viento de forma considerable.

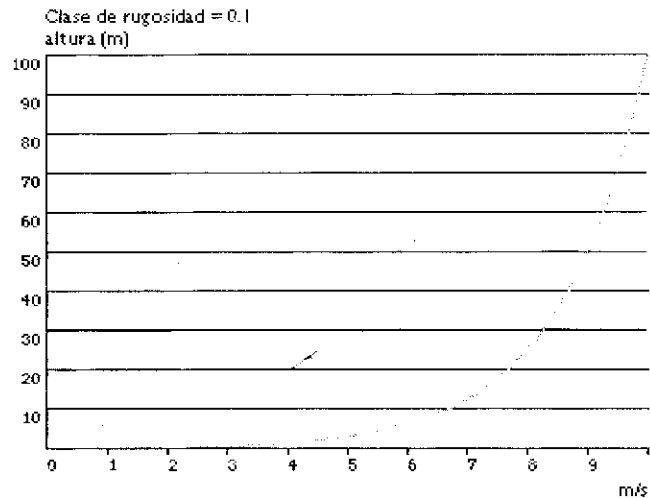
En la industria eólica, la gente suele referirse a clase de rugosidad o longitud de rugosidad cuando se trata de evaluar las condiciones eólicas de un paisaje. Una alta rugosidad de clase 3 a 4 se refiere a un paisaje con muchas árboles y edificios, mientras que a la superficie del mar le corresponde una rugosidad de clase 0.

**Tabla 3**  
**Clases y longitudes de rugosidad**

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad m ( $z_0$ )	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0,0002	100	Superficie del agua
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, e.g., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortada, etc.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3,5	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

### 3.3.2. Cizallamiento del viento

El hecho de que el perfil del viento se mueva hacia velocidades más bajas conforme nos acercamos al nivel del suelo suele llamarse cizallamiento del viento.



Gráfica 1. Cizallamiento del viento

Este gráfico muestra cómo varía la velocidad del viento en una rugosidad de clase 2, considerando que el viento sopla a una velocidad de 10 m/s a 100 m de altura.

### 3.4. Variabilidad de la velocidad del viento

La velocidad del viento está siempre fluctuando, por lo que el contenido energético del viento varía continuamente. De qué magnitud sea exactamente esa fluctuación depende tanto de las condiciones climáticas como de las condiciones de superficie locales y de los obstáculos.

La producción de energía de una turbina eólica variará conforme varíe el viento, aunque las variaciones más rápidas serán hasta cierto punto compensadas por la inercia del rotor de la turbina eólica.

Generalmente el viento sopla más fuerte por el día que por la noche. Esta variación se debe sobre todo a que las diferencias de temperatura, e.g. entre la superficie del mar y la superficie terrestre, son mayores durante el día que durante la noche.

### 3.5. Turbulencia

Normalmente las tormentas suelen venir asociadas a ráfagas de viento que cambian tanto en velocidad como en dirección. En áreas cuya superficie es muy accidentada y tras obstáculos como edificios, también se producen muchas turbulencias, con flujos de aire muy irregulares, con remolinos y vórtices en los alrededores.

En la ilustración 7 puede verse un ejemplo de cómo la turbulencia aumenta las fluctuaciones en la velocidad del viento.

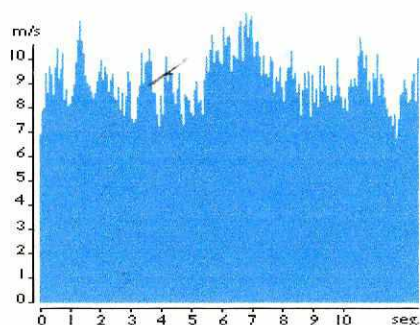


Ilustración 7

Las turbulencias disminuyen la posibilidad de utilizar la energía del viento de forma efectiva en un aerogenerador. También provocan mayores roturas y desgastes en la turbina eólica. Las torres de aerogeneradores suelen construirse lo suficientemente altas como para evitar las turbulencias del viento cerca del nivel del suelo.

### 3.6. Obstáculos al Viento

Los obstáculos del viento, tales como edificios, árboles, formaciones rocosas, etc., pueden disminuir la velocidad del viento de forma significativa y a menudo crean turbulencias en torno a ellos. Como puede verse en la ilustración 8, de típicas corrientes de viento alrededor de un obstáculo, la zona de turbulencias puede extenderse hasta una altura 3 veces superior a la altura del obstáculo. La turbulencia es más acusada detrás del obstáculo que delante de él. Así pues, lo mejor es evitar grandes obstáculos cerca de las turbinas eólicas, y en particular si se encuentran en la parte donde sopla el viento dominante.

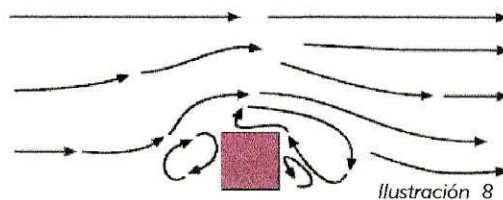


Ilustración 8

### 3.6.1. Resguardo tras los obstáculos

Los obstáculos disminuirán la velocidad del viento corriente abajo del obstáculo. Esta disminución depende de la porosidad del obstáculo, es decir, qué tan "abierto" sea el obstáculo. La porosidad se define como el área libre dividida por el área total del objeto de cara al viento (Snell, 1997:36).

Obviamente, un edificio es sólido y no tiene porosidad mientras que un árbol completamente abierto en invierno (sin hojas) puede dejar pasar a su través más de la mitad del viento. Sin embargo, en verano el follaje puede ser muy denso, con lo que puede hacer disminuir la porosidad hasta dejarla en una tercera parte.

El efecto de frenado del viento que un obstáculo produce aumenta con la altura y la longitud del mismo. Obviamente, el efecto será más pronunciado cerca del obstáculo y cerca del suelo.

### 3.6.2. Efecto de estela

Detrás de una turbina se forma una estela, es decir, una larga cola de viento bastante turbulenta y de baja velocidad, si se compara con el viento que llega a la turbina.

Cuando se desean instalar varias turbinas, para evitar una turbulencia excesiva corriente abajo alrededor de las turbinas, cada una de ellas suele estar separada del resto una distancia mínima equivalente a tres diámetros del rotor. En las direcciones de viento dominante esta separación es incluso mayor.

### 3.6.3. Efecto túnel

Si se toma un camino entre dos edificios altos o en un paso estrecho entre montañas, observará que se incrementa la velocidad del viento: el aire se comprime en la parte de los edificios o de la montaña que está expuesta al viento, y su velocidad crece considerablemente entre los obstáculos del viento. Lo que podemos expresar como la continuidad del flujo másica del aire con la siguiente ecuación:

$$V = Q/A$$

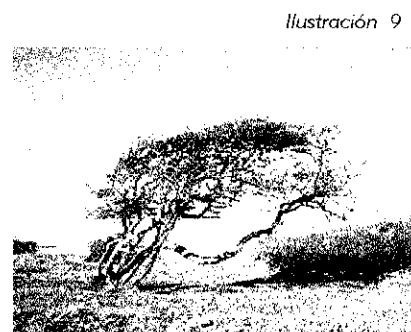
Siendo  $V$  la velocidad del viento,  $Q$  el caudal de fluido y  $A$  el área perpendicular a la dirección del fluido. Al reducir el área perpendicular, la velocidad sufre un incremento en su magnitud. Esto es lo que se conoce como efecto túnel. Así pues, incluso si la velocidad normal del viento en un terreno abierto puede ser de, digamos, 6 m/s, en un túnel natural puede fácilmente alcanzar los 9 m/s. Situar un

aerogenerador en un túnel de este tipo es una forma inteligente de obtener velocidades del viento superiores a las de las áreas colindantes.

Para obtener un buen efecto túnel, el túnel debe estar suavemente enclavado en el paisaje. En el caso de que las colinas sean muy accidentadas, puede haber muchas turbulencias en ese área, es decir, el viento soplará en muchas direcciones diferentes (y con cambios muy rápidos). Si hay muchas turbulencias, la ventaja que supone la mayor velocidad del viento se verá completamente anulada, y los cambios en el viento pueden causar roturas y desgastes innecesarios en el aerogenerador.

### 3.7. Selección del emplazamiento de un aerogenerador

Normalmente, el solo hecho de observar la naturaleza resulta de excelente ayuda a la hora de encontrar un emplazamiento apropiado para el aerogenerador. Los árboles y matorrales de la zona serán una buena pista para saber cuál es la dirección del viento dominante, como puede verse en la ilustración 9. Si nos movemos a lo largo de un litoral accidentado, observaremos que siglos de erosión han trabajado en una dirección en particular. La velocidad del viento es fuertemente influida por la rugosidad de la superficie del área circundante, por los obstáculos cercanos (como árboles, faros u otras construcciones) y por los alrededores del terreno local. Por lo que es imprescindible tomar estos aspectos a consideración para calcular el potencial energético disponible.



Las datos meteorológicos, son probablemente la mejor guía, aunque rara vez estos datos son recogidos directamente en su emplazamiento, por lo que hay que ser muy prudente al utilizarlos. Aparte de la disponibilidad de un buen recurso eólico existen otros elementos que técnica o económicamente pueden favorecer el desarrollo de proyectos:

- Poca complejidad del terreno.
- Baja turbulencia.
- Poca altura sobre el nivel medio del mar.
- Interconexión a sistemas eléctricos robustos.
- Cercanía con línea de interconexión.
- Facilidad de acceso al sitio.
- Características favorables del suelo.

## IV. CÁLCULO DE POTENCIA

### 4.1. Medición de la velocidad del viento

Las mediciones de las velocidades del viento se realizan normalmente usando un anemómetro de cazoletas, similar a la ilustración 10. El anemómetro de cazoletas tiene un eje vertical y tres cazoletas que capturan el viento. El número de revoluciones por segundo es registrado electrónicamente.

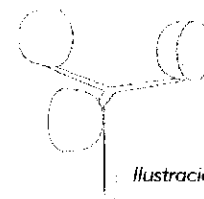


Ilustración 10

Los datos de las velocidades y direcciones del viento obtenidos por el anemómetro son recogidos en un chip electrónico en una pequeña computadora, que puede funcionar con batería durante un largo período de tiempo.

Otro método no tan preciso es el uso de una veleta de papel o plástico, esto es mucho más barato y sirve de referencia para determinar, dependiendo de la inclinación de la manga, si hay viento suficiente y qué tan turbulento puede ser. El inconveniente es que no se pueden registrar los valores automáticamente y es necesario poseer cierto criterio para hacer las anotaciones.

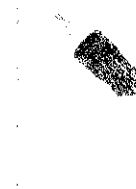


Ilustración 11

La mejor forma de medir la velocidad del viento en una futura localización de una turbina eólica es situar un anemómetro en el extremo superior de un mástil que tenga la misma altura que la esperada de la turbina que se va a utilizar. Esto evita la incertidumbre que conlleva el recalcular la velocidad del viento a una altura diferente.

Colocando el anemómetro en la parte superior del mástil se minimizan las perturbaciones de las corrientes de aire creadas por el propio mástil. Si el anemómetro está situado en la parte lateral del mástil es fundamental enfocarlo en la dirección de viento dominante para minimizar el abrigo del viento de la torre.

Para la instalación de aerogeneradores residenciales, si no se tiene ninguna estadística de velocidades de viento o ya bien no se posee ningún tipo de información útil, valdría la pena invertir en un anemómetro y hacer las mediciones pertinentes antes de decidir invertir en todo el equipo de producción de energía.

## 4.2. La energía en el viento

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par (fuerza de giro) actuando sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento.

### 4.2.1. Densidad del aire

La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa (o peso). Así, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen. En otras palabras, cuanto más pesado sea el aire, más energía recibirá la turbina. A presión atmosférica normal y a 15 °C el aire pesa unos 1,225 kilogramos (kg) por m<sup>3</sup>, aunque la densidad disminuye ligeramente con el aumento de la humedad. Además, el aire es más denso cuando hace frío que cuando hace calor. A grandes altitudes (en las montañas) la presión del aire es más baja y el aire es menos denso.

### 4.2.2. Área de barrido del rotor

Un aerogenerador típico de 1 kW tiene un diámetro del rotor de 3.0 m, lo que supone un área del rotor de unos 7.07 m<sup>2</sup>. El área del rotor determina cuánta energía del viento es capaz de capturar una turbina eólica. Dado que el área del rotor aumenta con el cuadrado del diámetro del rotor, una turbina que sea dos veces más grande recibirá  $2^2 = 2 \times 2 =$  cuatro veces más energía.

## 4.3. Potencia y energía del viento

La energía cinética  $E_c$  de una masa  $m$  que se mueve a una velocidad  $v$  es:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{iv.i}$$

Por otra parte, la masa  $m$  de un fluido de densidad  $\rho$  que, por unidad del tiempo atraviesa una área  $A$ , perpendicular al flujo, es:

$$m = A \rho v t \quad \text{iv.ii}$$

El viento es aire en movimiento, por lo tanto, la energía del viento (energía eólica) a través de una sección  $A$  (perpendicular a la dirección del viento), durante un tiempo  $t$ , es:

$$E_e = \frac{1}{2} (A \rho_a v_v t) v_v^2 = \frac{1}{2} A \rho_a t v_v^3 \quad \text{iv.iii}$$

Donde:

$\rho_a$  es la densidad del aire

$v_v$  es su velocidad

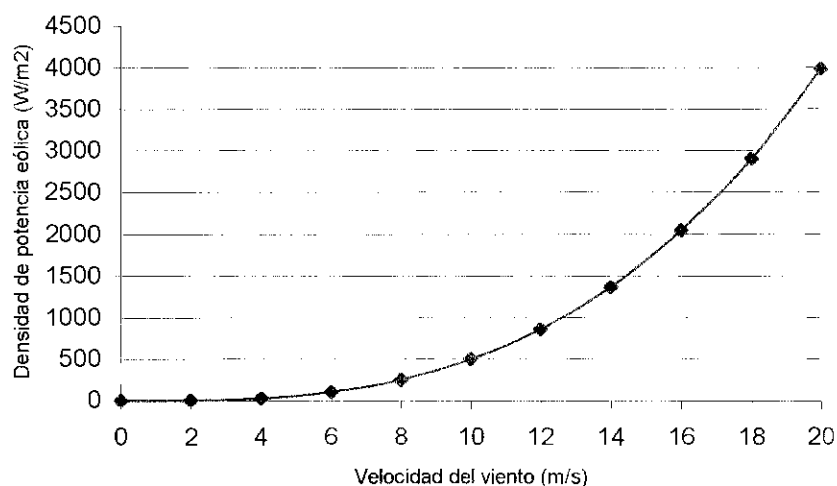
Por lo tanto, su potencia (energía por unidad de tiempo) es:

$$P_e = (E_e / t) = \frac{1}{2} A \rho_a v_v^3 \quad \text{iv.iv}$$

Y su potencia por unidad de área es:

$$P_e / A = \frac{1}{2} \rho_a v_v^3 \quad \text{iv.v}$$

Este parámetro (conocida como densidad de potencia eólica) determina la potencia que experimenta un rotor aerodinámico de eje horizontal por unidad de área de barrido. Como se puede notar la potencia del viento es directamente proporcional al cubo de su velocidad y, por ejemplo, si la velocidad del viento se duplica, su potencia es ocho veces mayor (ver gráfica 2)



Gráfica 2 . Densidad de potencia eólica (para una densidad del aire igual a  $0.9956 \text{ kg/m}^3$ )

Para la evaluación del recurso eólico en un sitio determinado la densidad del aire puede calcularse mediante.

$$\rho_{a,s} = 1.225 \left( \frac{288.15}{T_s} \right) \left( \frac{P_s}{101.33} \right) \quad (\text{kg/m}^3) \quad \text{iv.vi}$$

Donde:

$T_s$  es la temperatura ambiente promedio, en °K, durante n cierto período.

$P_s$  es la presión atmosférica promedio en el sitio, en kPa, durante el mismo período.

Las variaciones diurnas de la densidad debido a cambios de presión son pequeñas comparadas con los efectos de la temperatura estacional. Por ello, el promedio de la densidad del aire para un mes en un sitio específico se puede estimar mediante:

$$\rho_{a,m} = 1.225 \left\{ e^{(-z / 8435)} - [(T-15) / 288] \right\} \quad \text{iv.vii}$$

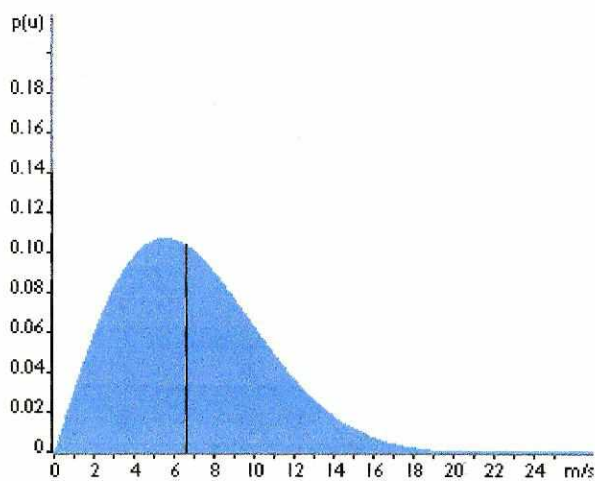
Donde:

$T$  es la temperatura ambiente promedio en el sitio, en °C, durante el periodo mensual.

$z$  es la altura del sitio sobre el nivel medio del mar, en metros.

## 4.4 Distribución de Weibull

Es muy importante ser capaz de describir la variación de las velocidades del viento. Para escoger una turbina es necesario la información para optimizar el potencial eólico, así como para minimizar los costes de generación.



Gráfica 3. Distribución de Weibull

Al medir las velocidades del viento a lo largo de un período de tiempo (un año preferiblemente), se observará que en la mayoría de áreas, los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos frescos y moderados son bastante comunes. La variación del viento en un emplazamiento típico suele

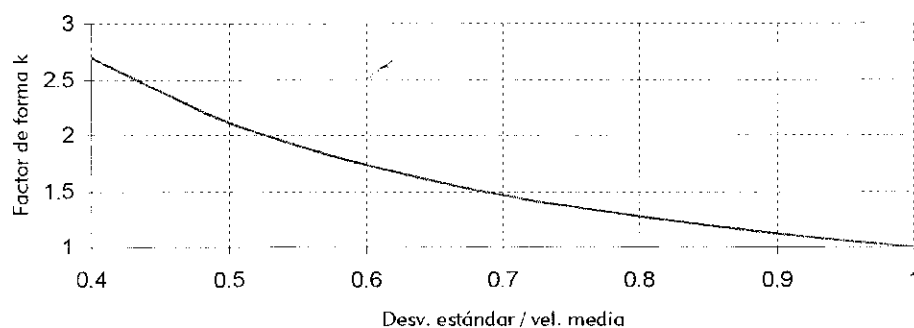
describirse utilizando la llamada Distribución de Weibull, como la mostrada en la gráfica 3. Este emplazamiento particular tiene una velocidad media del viento de 7 m/s, y la forma de la curva está determinada por un parámetro de forma  $k$  de 2.

De manera aproximada,  $k$  puede calcularse por medio de la expresión (Gráfica 4):

$$k \approx (\sigma / V)^{-1.082} \quad \text{para } 0.3 \leq (\sigma / V) \leq 1 \quad \text{iv.viii}$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar de la velocidad estacionaria del viento en el período.

$V$  es el promedio de la velocidad estacionaria del viento en el mismo período.



Gráfica 4. Aproximación del factor de forma  $k$  de la f.d.p. de Weibull

Los valores de  $k$  altas indican un régimen de viento más constante, es decir, la velocidad del viento tiene relativamente poca desviación con relación a su valor promedio. Un valor de  $k$  bajo indica lo contrario, y por ejemplo este último podría ser el caso de sitios donde típicamente a lo largo del día, se presentan velocidades muy bajas durante varias horas y velocidades relativamente altas durante una parte del día.

#### 4.4.1 Potencia media ponderada

Para calcular el contenido energético del viento promedio en el emplazamiento no debemos caer en el error de utilizar la velocidad media registrada ya que de este modo se estaría subestimando el recurso eólico en casi un 100%. Lo que se intenta resaltar es que no se debe simplemente tomar un promedio de las velocidades del viento y después utilizar la velocidad media del viento para sus cálculos de potencia. Se debe ponderar la probabilidad de cada velocidad del viento con la correspondiente cantidad de potencia. Por ejemplo, en el caso de la gráfica 3 se tiene una velocidad media del viento de 7 m/s lo que equivale a una potencia de entrada de 210 W/m<sup>2</sup>. Pero en este caso la potencia media ponderada de las velocidades del viento es de 8.7 m/s. A esa velocidad, la potencia es de 402 W/m<sup>2</sup>, que es casi el doble de la que se obtenía con el ingenuo cálculo anterior.

## 4.5 Ley de Betz

### 4.5.1 El tubo de corriente

El rotor de la turbina eólica debe obviamente frenar el viento cuando captura su energía cinética y la convierte en energía rotacional. Esto implica que el viento se moverá más lentamente en la parte izquierda del rotor que en la parte derecha.

Dado que la cantidad de aire por segundo que pasa a través del área barrida por el rotor desde la derecha, debe ser igual a la

que abandona el área del rotor por la izquierda, el aire ocupará una mayor sección transversal (diámetro) detrás del plano del rotor. Este efecto puede apreciarse en la ilustración 12, donde se muestra un tubo imaginario, el llamado **tubo de corriente**, alrededor del rotor de la turbina eólica. El tubo de corriente muestra cómo el viento moviéndose lentamente hacia la izquierda ocupará un gran volumen en la parte posterior del rotor. El viento no será frenado hasta su velocidad final inmediatamente detrás del plano del rotor. La ralentización se producirá gradualmente en la parte posterior del rotor hasta que la velocidad llegue a ser prácticamente constante.

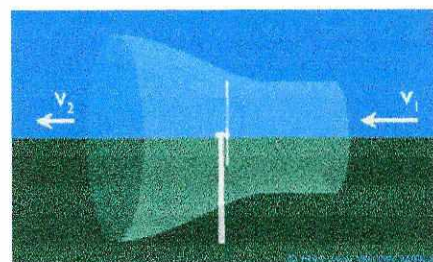


Ilustración 12

### 4.5.2 Distribución de la presión del aire

La ilustración 13 muestra la presión del aire en el eje vertical, siendo el eje horizontal la distancia al plano del rotor. El viento llega por la derecha, estando situado el rotor en el centro del gráfico. La

presión del aire aumenta gradualmente a medida que el viento se acerca al rotor desde la derecha, ya que el rotor actúa de barrera del viento. Se observa que la presión del aire caerá inmediatamente detrás del plano del rotor (parte izquierda), para enseguida aumentar de forma gradual hasta el nivel de presión normal en el área.

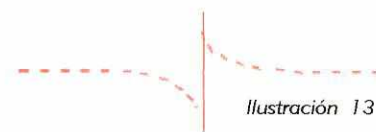


Ilustración 13

### 4.5.3 La ley de Betz

La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de  $16/27$  (el 59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador. La ley de Betz fue formulada por primera vez por el físico alemán Albert Betz en 1919. Su libro "Wind-Energie", publicado en 1926, proporciona buena parte del conocimiento que en ese momento se tenía sobre energía eólica y aerogeneradores.

### 4.5.3.1 Demostración de la ley de Betz

Considerando, que la velocidad promedio del viento a través del área del rotor es el promedio de la velocidad del viento sin perturbar antes de la turbina eólica,  $v_1$ , y la velocidad del viento después de su pasa por el plano del rotor,  $v_2$ , esto es,  $(v_1 + v_2)/2$ . (Betz ofrece una demastración de esto). La masa de la corriente de aire a través del rotor durante un segundo es

$$m = \rho A (v_1 + v_2)/2 \quad \text{iv.ix}$$

dande  $m$  es la masa par segundo,  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área barrida par el rotor y  $[(v_1+v_2)/2]$  es la velocidad del viento promedia a través del área del rotor. La potencia del viento extraída par el rotor es igual a la masa por la diferencia de los cuadrados de la velocidad del viento (de acuerda con la segunda ley de Newton):

$$P = (1/2) m (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{iv.x}$$

Sustituyendo en esta expresián la  $m$  de la primera ecuación obtenemas la siguiente expresi3n para la potencia extraída del viento:

$$P = (\rho/4) (v_1^2 - v_2^2) (v_1+v_2) A \quad \text{iv.xi}$$

Ahora, comparanda el resultado can la potencia total de una corriente de viento na perturbada a través de exactamente la misma área  $A$ , sin ningún rotor que bloquee el viento. Se le llama a esta potencia  $P_0$ :

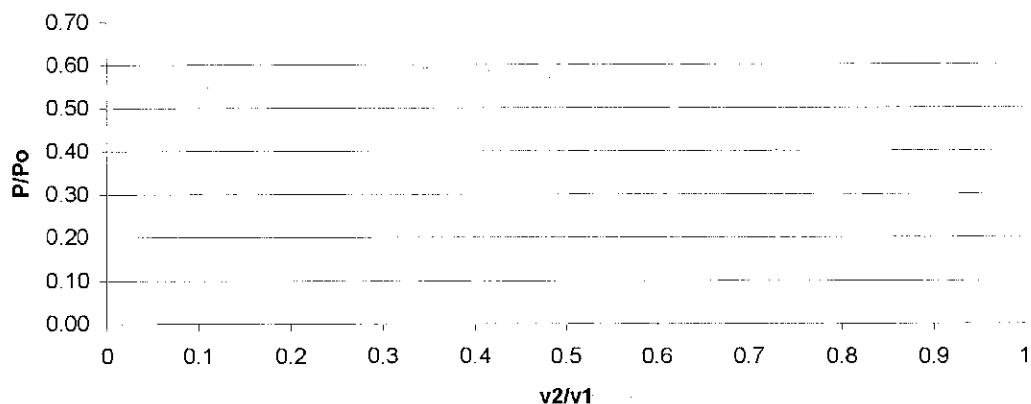
$$P_0 = (\rho/2) v_1^3 A \quad \text{iv.xii}$$

La relación entre la potencia que se extrae del viento y la patencia del viento sin perturbar es:

$$(P/P_0) = (1/2) (1 - (v_2 / v_1)^2) (1 + (v_2 / v_1)) \quad \text{iv.xiii}$$

Dibujando  $P/P_0$  en función de  $v_2/v_1$  se observa que la función alcanza su máximo para  $v_2/v_1 = 1/3$ , y que el valar máximo de la patencia extraída del viento es de 0,59 veces ó  $16 / 27$  de la potencia total del viento. Por lo que nuestra ecuación iv.v se modifica de la siguiente forma:

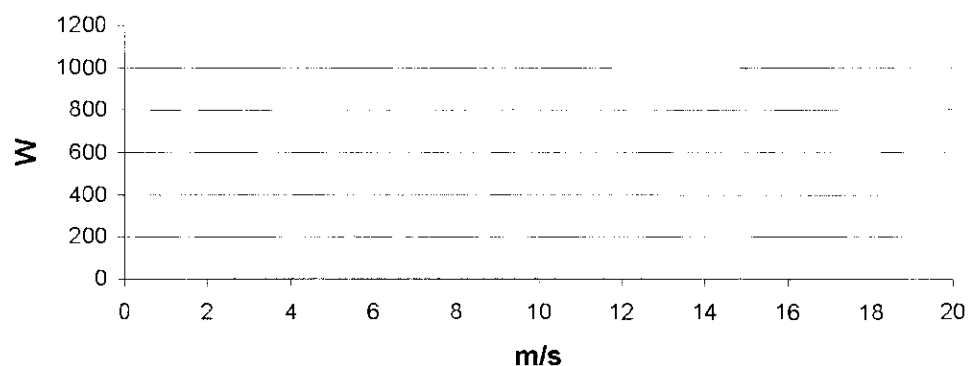
$$P/A = \frac{16}{27} \frac{\rho}{2} v^3 \quad \text{iv.xiv}$$



Gráfica 5. Curva relación de potencia comparada con la relación de velocidad

## 4.6 Curva de potencia de un aerogenerador

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento. Las curvas de potencia se obtienen a partir de medidas realizadas en campo, donde un anemómetro es situado sobre un mástil relativamente cerca del aerogenerador.



Gráfica 6. Curva de potencia de una Whisper H-80 de 1 kW

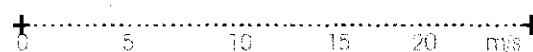
Una curva de potencia **no** indicará cuánta potencia producirá un aerogenerador a una cierta velocidad del viento media. Ni siquiera se acerca usando este método. Es importante recordar que el contenido de energía varía fuertemente con la velocidad del viento. Por lo tanto, es muy importante la forma a la que se ha llegado a ese promedio, es decir, si los vientos varían mucho o si soplan a una velocidad relativamente constante.

## 4.7 Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad. Para medir la eficiencia mecánica de un aerogenerador, se debe dividir la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada. En otras palabras, tomamos la curva de potencia y la dividimos por el área del rotor para obtener la potencia disponible por metro cuadrado de área del rotor. Posteriormente, para cada velocidad del viento, dividimos el resultado por la cantidad de potencia en el viento por metro cuadrado.

0.44

Gráfica 7.



El gráfico 7 muestra la curva del coeficiente de potencia para un aerogenerador danés típico. Aunque la eficiencia media de estos aerogeneradores suele estar por encima del 20 %, la eficiencia varía mucho con la velocidad del viento.

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

## V. FUNCIONAMIENTO DE UN AEROGENERADOR

### 5.1 Aerodinámica de aerogeneradores

El rotor, compuesto por las palas del rotor y el buje, está situado corriente arriba de la torre y la góndola en la mayoría de aerogeneradores modernos. Esto se hace porque la corriente de aire tras la torre es muy irregular (turbulenta).

¿Qué hace girar el rotor? La respuesta parece obvia: el viento. Pero en realidad, no se trata simplemente de moléculas de aire que chocan contra la parte delantera de las palas del rotor. Los aerogeneradores modernos toman prestada de los aviones y los helicópteros tecnología ya conocida, además de tener algunos trucos propios más avanzados, ya que los aerogeneradores trabajan en un entorno realmente muy diferente, con cambios en las velocidades y en las direcciones del viento.

#### 5.1.1 Palas del rotor

¿Cómo vuela un aeroplano?

Es frecuentemente comentado y afirmado que la razón es por una diferencia de presión entre la superficie superior y la inferior debido a que el aire que se desliza a lo largo de la superficie superior del ala se mueve más rápidamente que el de la superficie inferior. Esto implica una presión más baja en la superficie superior, lo que crea la sustentación, es decir, la fuerza de empuje hacia arriba que permite al avión volar. La sustentación es perpendicular a la dirección del viento.



Ilustración 14

Esta es muy cierto, pero la fuerza que impulsa al avión a elevarse proviene gracias al efecto de Coanda en donde se aplica la tercera ley de Newton, a cada acción corresponde una reacción igual y opuesta (Resnick, 1997:94). El viento al salir por el ala, como se observa en la Ilustración 14, se dirige hacia abajo, por consiguiente el viento empuja al ala hacia arriba. Las alas son forzadas hacia arriba debido a que son inclinadas y desvían el aire hacia abajo. Tanto, la superficie superior, como la inferior del ala desvían el aire. La superficie superior desvía el aire hacia abajo debido a que la corriente de aire se desliza por toda la superficie como si estuviera pegada y sigue la inclinación del ala (fenómeno al cual se la llama efecto de Coanda).

### 5.1.1.1 Pérdida de sustentación

Ahora bien, ¿qué es lo que ocurre cuando un avión se inclina demasiado hacia atrás en un intento de subir más rápidamente? La sustentación del ala va de hecho a aumentar, de repente el flujo de aire de la superficie superior deja de estar en contacto con la superficie del ala. En su lugar, el aire gira alrededor de un vórtice irregular (condición que también se conoce como turbulencia). Bruscamente, la sustentación del ala desaparece. Este fenómeno es conocido como **pérdida de sustentación**. Un avión perderá la sustentación si la forma del ala va disminuyendo demasiado rápidamente conforme el aire se mueve a lo largo de su dirección general de movimiento (por supuesto, no va a ser el ala propiamente dicha la que cambie su forma, sino el ángulo que forma el ala con la dirección general de la corriente, también conocido como ángulo de ataque). Es posible observar que la turbulencia es creada en la cara posterior del ala en relación con la corriente de aire.

### 5.1.1.2 Dirección de la sustentación

En la ilustración 15 se ha extraído una de las palas del rotor del aerogenerador fuera de su buje, y se observa desde el buje hacia el extremo, en la parte posterior de la pala. El viento en el paisaje sopla desde la parte inferior del dibujo, mientras que el extremo de la pala gira hacia la parte izquierda de la imagen. En la ilustración se observa que el ángulo de ataque del viento cambia mucho más bruscamente en la base de la pala (línea clara), que en el extremo de la pala (línea oscura). Si el viento llega a ser lo suficientemente fuerte como para que haya una pérdida de sustentación, este fenómeno empezará en la base de la pala.

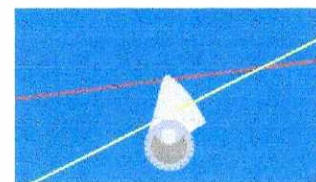


Ilustración 15

Cortemos ahora la pala del rotor en el punto por el que pasa la línea amarilla. En la ilustración 16, la flecha gris muestra la dirección de la sustentación en ese punto. La sustentación es perpendicular a la dirección del viento. Tal y como se puede observar, la sustentación empuja la pala parcialmente en la dirección que nosotros queremos, es decir, hacia la izquierda. Sin embargo, también la dobla otro tanto.

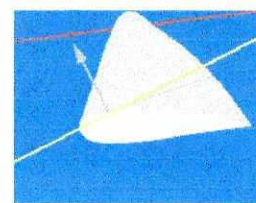


Ilustración 16

## 5.2 Componentes

### 5.2.1 Aspas del rotor

Éstas capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje. En un aerogenerador de unos 1,000 W cada pala mide alrededor de 1.5 m de longitud y su diseño es muy parecido al del ala de un avión. Las aspas están hechas de aluminio o de compuesto reforzado con fibra de carbono, las cuales se tuercen conforme la turbina alcanza su salida nominal. Este efecto de "torcerse" cambia la forma del aspa, causando una desaceleración en ellas, limitando así las revoluciones por minuto del alternador, para proteger la turbina de daños causadas por vientos fuertes.

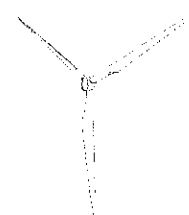


Ilustración 17

### 5.2.2 Generador

El aerogenerador convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Los aerogeneradores son algo inusuales, si se les compara con los otros equipos generadores que suelen encontrarse conectados a residencias. Una de las razones es que el generador debe trabajar con una fuente de potencia (el rotor de la turbina eólica) que suministra una potencia mecánica muy variable (torque).

Un alternador rectifica internamente su potencia a corriente directa. Se funda en la corriente inducida variable que se genera en una bobina cuando gira en un campo magnético. Las alternadores de turbina están diseñados por los fabricantes para alcanzar valores que se acerquen lo más posible al cubo de la energía del viento. Algunos de ellos, los de mejor calidad están contruidos con magnetos permanentes de baro de hierro de neodimio para un funcionamiento superior y libre de mantenimiento.



Ilustración 18

### 5.2.3 Reguladores y controles electrónicos

Los controles electrónicos realizan varias funciones para asegurar una salida máxima. Los controles mantienen una carga constante sobre el alternador en todo momento para asegurar que la turbina nunca sobrepase la velocidad máxima permitida para la misma, independientemente de la condición de la batería. Conforme la batería es cargada, el regulador comprueba periódicamente la línea, corrigiendo la pérdida de voltaje y revisando el nivel de carga. Una vez que la batería ha alcanzado su nivel óptimo de carga, el regulador disminuye la velocidad de las aspas para reducir ruidos y corta la transmisión de carga, previniendo que la batería se sobrecargue.

### 5.2.4 Cola de orientación

El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina en contra del viento. Este es la única opción para los aerogeneradores de uso residencial por su bajo costo y practicidad. El mecanismo de orientación viene unido directamente al aerogenerador como se observa en la Ilustración 19 y 20.



Ilustración 19

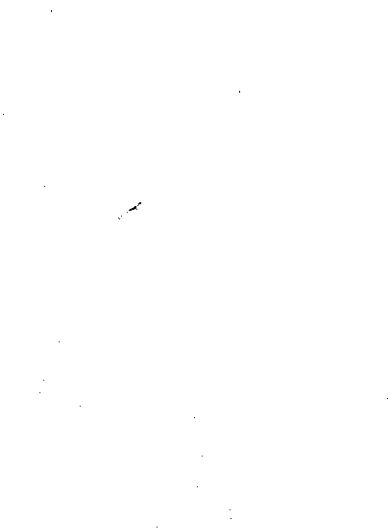


Ilustración 20

### 5.2.5 La torre

Generalmente es una ventaja disponer una torre alta, dado que las velocidades del viento aumentan conforme nos alejamos del nivel del suelo. Las torres pueden ser tubulares o de celosía dependiendo del tamaño del aerogenerador y del gusto de cada persona.

### 5.2.6 Baterías

Dado que una característica esencial del viento es su discontinuidad en el tiempo, se han realizado diversos estudios destinados a desarrollar sistemas que permitan almacenar la energía producida por el viento y no utilizada directamente durante los períodos de producción a fin de restituir una parte, la mayor posible, durante horas o días de calma. Este aspecto de la energía eólica es, aún hoy, uno de los que más frenan su desarrollo, ya que este almacenamiento, es más importante cuanto más irregular sea el régimen de vientos y constituye frecuentemente una porcentaja muy alto ( 30% aprox.) del costo total de instalación, dependiendo de tipo del mismo.

Hay que remarcar que todos los dispositivos de almacenamiento, incluidas las baterías de acumuladores, tienen rendimientos entre el 70% y el 80%.

La batería es un dispositivo eléctrica de almacenaje. Éstas no son un 100% eficientes, algo de energía se pierde en forma de calor o de reacciones químicas cada vez que se carga y se descarga, por ejemplo, si se usan 1,000 W de una batería serán necesarios 1,200 W para recargarla. Las eficiencias típicas en las baterías varían de un 85 – 95 % para las de plomo-ácido y de un 65 % para la NiCad. A pesar de que existen varias tipos de baterías, las que se usan predominantemente son las de plomo-ácido ya que compiten mejor en precio que las otras. La vida de las baterías varía desde un año hasta ocho años dependiendo del tipo y de uso y mantenimiento que se les brinde.

### 5.2.7 Cables y sus dimensiones

Es importante considerar el tamaño de los cables a utilizar cuando se va a instalar un aerogenerador. Por lo general los aerogeneradores transmiten electricidad por corriente continua. Por esta razón conforme se incrementa la distancia desde el aerogenerador hasta el banco de baterías, las pérdidas de energía también aumentan. La pérdida de potencia es proporcional a la corriente; mientras más alta la corriente, mayor será la pérdida. Este fenómeno es particularmente importante a bajos voltajes y altas corrientes.

Se recomienda que se utilice un cable calibre #6 para conectar el generador con las baterías si estos no están a más de 20 m.

A continuación se presenta una tabla con las dimensiones recomendadas para diferentes condiciones

**Tabla 4. Calibre de cable a utilizar**

0-23 m	24 – 37 m	38 – 58 m	59 – 91 m	92 – 117 m	118 – 149 m
#6	#4	#2	#1	#0	#00

### 5.3 Control de potencia

Los aerogeneradores están diseñados para producir energía eléctrica de la forma más barata posible. Así pues, están generalmente diseñados para rendir al máximo a velocidades alrededor de 13.5 m/s. Es mejor no diseñar aerogeneradores que maximicen su rendimiento a vientos más fuertes, ya que los vientos tan fuertes no son comunes. En el caso de vientos más fuertes es necesario gastar parte del exceso de la energía del viento para evitar daños en el aerogenerador. En consecuencia, todos los aerogeneradores están diseñados con algún tipo de control de potencia. Hay dos formas de hacerlo con seguridad en los modernos aerogeneradores.

### 5.3.1 Regulación por variación de área de captación

Estos sistemas son dominantes en máquinas de pequeña envergadura ya que se complementan con la estructura de la cola de orientación. Su principio fundamental es el de reducir el área de captación o área del rotor en posición perpendicular a la corriente de aire incidente cuando la velocidad de ésta supera cierto valor crítico. El sistema de detección de la energía en exceso y el de actuación lo forman el mismo rotor y su vinculación a la torre a través de una bisagra.

Como ya vimos al desarrollar la teoría de cantidad de movimiento axial o de Betz, al incidir el viento sobre el rotor se genera sobre éste una fuerza en la dirección y sentido de la corriente de aire. Si el eje del rotor, lugar donde se aplica esta fuerza, no pertenece al plano vertical que contiene al eje de la torre, donde gira el conjunto bisagra-rotor según la dirección del viento, se originará una palanca que desalineará al rotor respecto a la dirección del viento. Ahora, si limitamos este gira mediante un resorte calibrado conectado por un lado al rotor y por el otro a la estructura de la cola del molino lograremos que solamente cuando existan corrientes de aire a velocidades superiores a la nominal, se presente la desalineación mencionada, llamándose este sistema "furling"

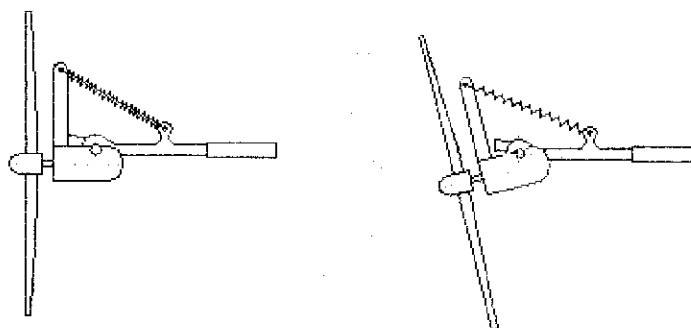
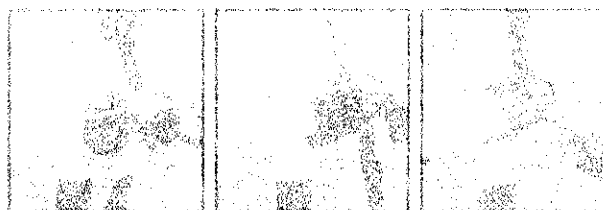


Ilustración 21

### 5.3.2 Regulación por pérdida aerodinámica "stall controlled"

Los aerogeneradores de regulación (pasiva) por pérdida aerodinámica tienen las palas del rotor unidas al buje en un ángulo fijo. Sin embargo, el perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se cree

turbulencia en la parte de la pala que no da al viento. Esta pérdida de sustentación evita que la fuerza ascensional de la pala actúe sobre el rotor. La pala del rotor de un aerogenerador regulado por pérdida aerodinámica está ligeramente torsionada a lo largo de su eje longitudinal. Esto es así en parte para asegurar que la pala pierde la sustentación de forma gradual, en lugar de hacerlo bruscamente, cuando la velocidad del viento alcanza su valor crítico.

La principal ventaja de la regulación por pérdida aerodinámica es que se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control. Por otro lado, la regulación por pérdida aerodinámica representa un problema de diseño aerodinámico muy complejo, y comporta retos en el diseño de la dinámica estructural de toda la turbina, para evitar las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación. Alrededor de las dos terceras partes de los aerogeneradores que actualmente se están instalando en todo el mundo son máquinas de regulación por pérdida aerodinámica.

## VI. GEOGRAFÍA DEL SECTOR B-1 DE CIUDAD SAN CRISTÓBAL

### 6.1 Localización de la zona de estudio.

Este punto es de suma importancia para el desempeño de el aerogenerador. Como ya se explicó anteriormente dependiendo de la geografía de la zona, el viento podrá transmitir más energía aprovechable.

La zona de estudio de esta tesis está ubicada en el sector B-1 de Ciudad San Cristóbal, zona 8 de Mixco, Guatemala. Se escogió esta localidad debido a su accesibilidad, y que por su ubicación, es notable un régimen de viento mayor.

Según los datos otorgados por el INSIVUMEH (Instituto nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología) la dirección del viento dominante en la ciudad capital es la noroeste. Al Este de el sector B-1 de Ciudad San Cristóbal existe un barranco, lo cual beneficia el incremento en la velocidad del viento, pero a la vez puede perjudicar la eficiencia del aerogenerador si las turbulencias que se forman en él son demasiadas. A continuación se presentan las características de la zona de estudio.

Altitud (sobre el nivel del mar)	1560 m
Presión	83.63 kPa
Temperatura promedio	20 °C
Densidad del aire	0.9944 kg /m <sup>3</sup>
Clase de rugosidad	2.5

Tabla 5. Características geográficas generales

Con el objetivo de que la comprensión de las condiciones geográficas sea sencilla, en el estudio de campo se tomaron algunas fotografías de la zona, las cuales servirán de referencia para estimar la fuerza del viento y sus velocidades equivalentes según la escala de Beaufort (Tabla 7). También se muestra un mapa a escala de dicha zona para facilitar la comprensión.

El sector B-1 de Ciudad San Cristóbal está compuesto en un 95 % de casas de 2 o menos niveles y el sector está en un 80% poblado. Por este motivo se escogió una rugosidad clase 2.5 (Tabla 8). La temperatura y altura se obtuvieron gracias a la información brindada por el INSIVUMEH.

## 6.2. Fotografías y mapas de las zona

### 6.2.1 Fotografías



En las primeras dos fotografías se indicó con una línea roja punteada la inclinación que tiene el tronco de cada árbol, mostrando la fuerza que ha ejercido el viento en ellos con forme han crecido. En la fotografía 3, se muestra el área que abarcan las ramas con respecto a un eje vertical, para de nuevo comprobar que las ramas han encontrado mayor facilidad de crecer hacia la dirección izquierda, misma dirección que la del viento dominante.



Las fotografías 4 y 5 fueron tomadas al norte de la zona de estudio y en estas se muestra cómo el viento afecta el sector que está del otro lado del barranca anexa al sector B-1 de Ciudad San Cristobal. Pudiendo corroborar que el viento trae la misma dirección unos 400 a 500 m antes, hacia el norte-este.



6



7



8

Las fotografías anteriores demuestran que la forma de los árboles resultan de mucha ayuda, para comenzar a buscar la ubicación para instalar un aerogenerador, ya que éstos indican qué tan fuerte y constante puede ser el viento. En todos se observa una mayor tendencia hacia el Oeste.



9



10

En las Fotografías 9 y 10 se observa que con alturas de 10m a 20m como en el caso de las palmeras, hay suficiente viento para considerar la instalación de un aerogenerador.

## 6.2.2 Mapas

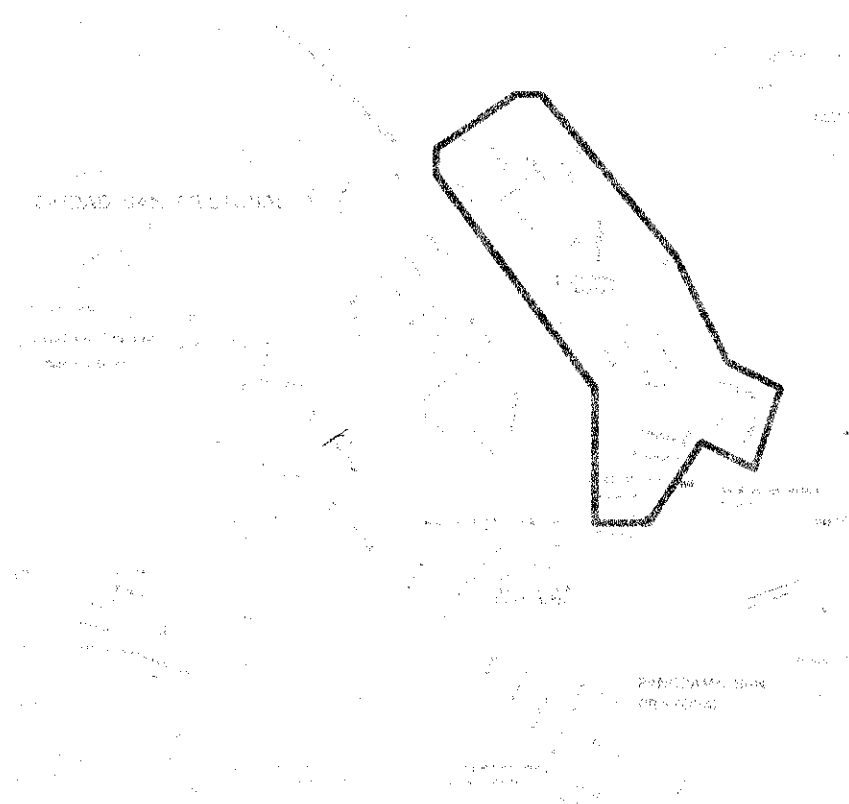
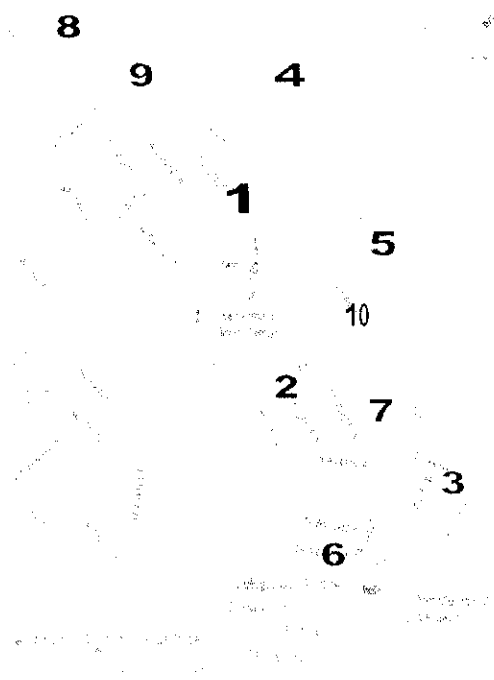


Ilustración 22

La ilustración 22, es un mapa de Ciudad San Cristóbal, y está marcado al rededor con color negro el sector B-1 de dicha zona.

La ilustración 23 muestra en dónde fueron tomadas las fotografías anteriores, señalizadas con los mismos números que aparecen en la parte inferior de cada una de ellas.

Al Este del sector B-1 existe un barranco y posteriormente un área verde, constituida básicamente por pinos, los cuales se aprecian en las fotografías anteriores.



En la ilustración 24 se indica con color rojo el perímetro del área donde hay menos interferencia de construcciones y por consiguiente un régimen mayor y más estable de viento. En estos lugares se obtendrán mayores eficiencias en aerogeneradores si se llegaran a instalar.

En las demás áreas sopla un viento moderado, pero no hay que olvidar que la turbulencia aquí debe ser mayor, por lo que el aerogenerador debería ser instalado a una mayor altura.

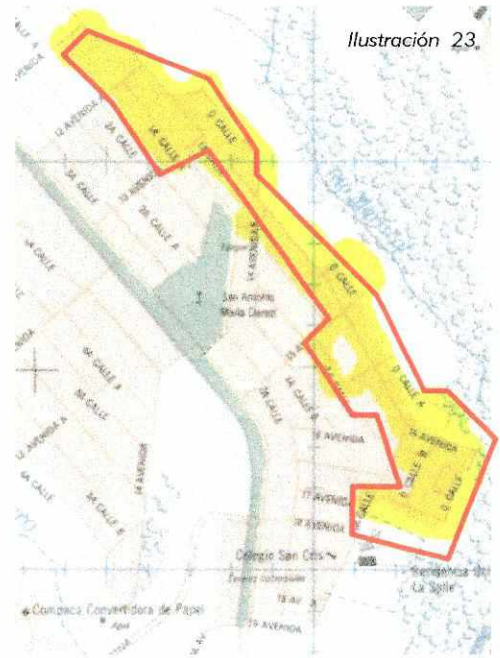


Ilustración 23.

Ilustración 24

## VII. CONDICIONES EÓLICOAS

Las opciones para deducir la velocidad de viento promedio se vieron limitadas por diferentes factores, el INSIVUMEH no posee anemómetros en esta zona del país, de hecho, el anemómetro más cercano está instalado en el aeropuerto internacional La Aurora (aproximadamente a 9 km de Ciudad San Cristóbal), y está situado a una altura de 5 m sobre el nivel del suelo, donde las mismas paredes de la institución obstruyen el viento. Por consiguiente no poseen datos confiables. La opción de comprar un anemómetro para el proyecto implicaba una inversión no contemplada para esta tesis, lo que la imposibilitaba.

Así que se decidió a utilizar la escala Beaufort (Tabla 2.2) y se llegó a las siguientes estimaciones de las velocidades promedios en la zona de estudio:

Tabla 6. Velocidad del viento en la zona señalizada de la ilustración 24.

Color	Escala Beaufort	Clasificación	m / s
Amarillo	4	Brisa moderada	5.8 – 7.0
Sin color	3	Brisa floja	3.6 – 5.8

Estos valores están afectados a cambios según la temporada y a un bajo grado de exactitud, debido al método tan poco preciso. Para fines de esta tesis, los rangos son suficientes para analizar el aprovechamiento de los aerogeneradores y su conveniencia económica.

Con el fin de obtener las eficiencias de los aerogeneradores a los cuales se tiene acceso en Guatemala, se calculó la potencia máxima por metro cuadrado obtenible considerando la ley de Betz.

Tabla 7. Potencia teórica del viento

<b>Velocidad</b>	<b>Potencia</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Potencia</b>
<i>m / s</i>	<i>W / m<sup>2</sup></i>	<i>m / s</i>	<i>W / m<sup>2</sup></i>
1	0.29	8	150.19
2	2.35	9	213.85
3	7.92	10	293.35
4	18.77	11	390.45
5	36.67	12	506.91
6	63.36	13	644.49
7	100.62	14	804.95

(para densidad del aire de 0.9944 kg / m<sup>3</sup>)

# VIII. ELECCIÓN DE EL AEROGENERADOR SEGÚN ASPECTOS ECONÓMICOS

## 8.1 Aerogeneradores del mercado local

Entre la gran variedad de aerogeneradores que existen en el mercado mundial, en esta tesis se nombran cuatro modelos distintos, los cuales son fabricados por la misma compañía, la cual tiene un distribuidor en Guatemala llamado DINTERSA S.A.

Las especificaciones de potencia nominal y diámetro del rotor son brindadas por el fabricante, Southwest windpower inc. empresa estadounidense con varios años de experiencia en la construcción de aerogeneradores. A continuación se presentan por orden de potencia lo cuatro modelos:

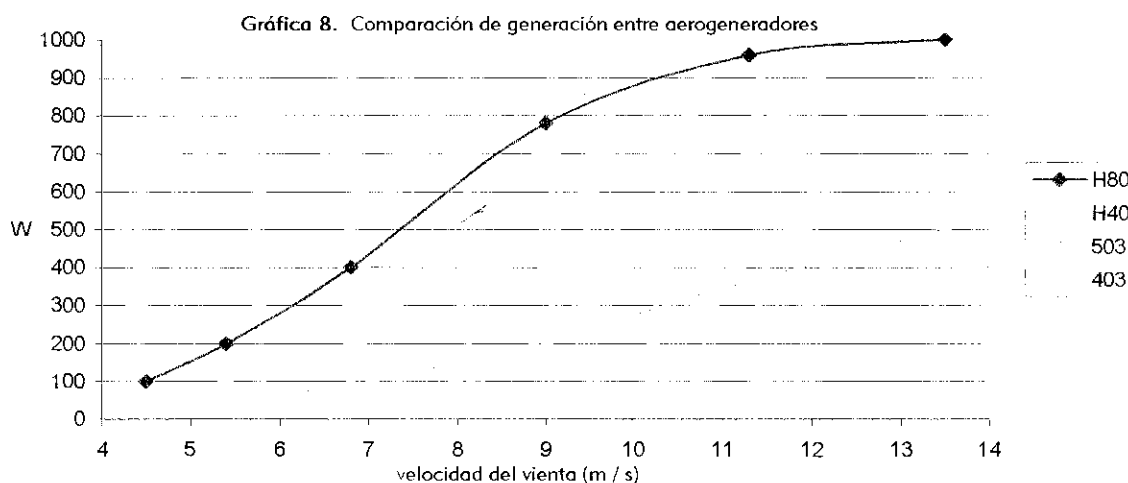
Tabla 8. Modelos de Aerogeneradores disponibles

Modelo	Diámetro del Rotor	Velocidad de arranque (m/s)	Potencia nominal
H 80	3.0 m	3.1	1000 W @10.5 m/s
H 40	2.1 m	3.4	900 W @12.5 m/s
503	1.52 m	3.1	500 W @12.5 m/s
403	1.14 m	3.0	400 W @12.5 m/s

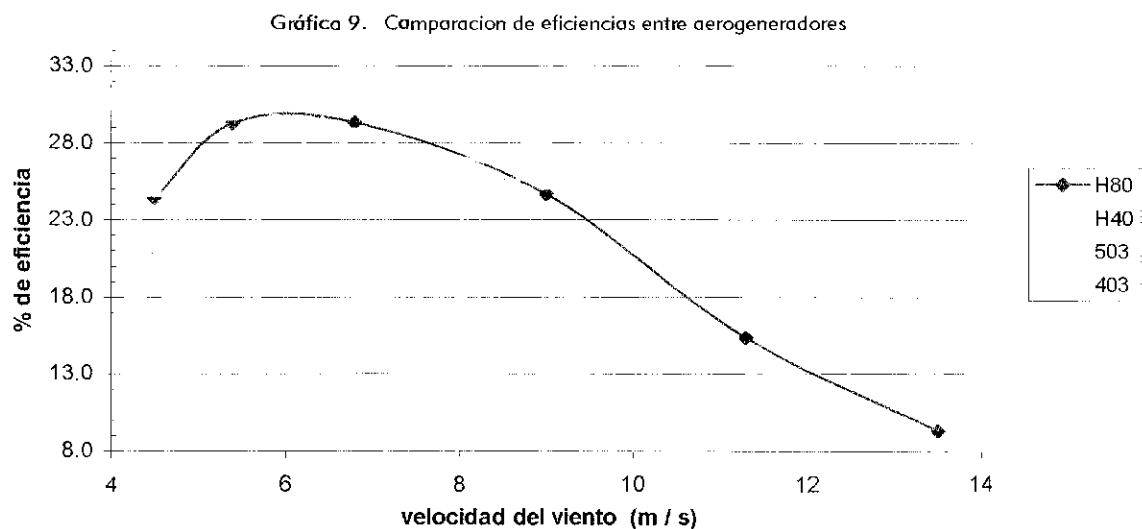
A estos aerogeneradores se aplicaron los mismos análisis, para obtener sus eficiencias reales, sus producciones mensuales de potencia, sus costos en dólares estadounidenses por kWh y sus relaciones de costo beneficio. Todo esto a partir de sus curvas de generación de energía, las cuales las brinda el fabricante (Southwest windpower inc.), tomando en cuenta distintas velocidades promedio del viento, estimando que la media ponderada incrementa la producción en apenas un 54 %, y el costo de la electricidad en la zona de estudio. Conforme se avance en cada tema se ampliará la información correspondiente.

## 8.2 Generación y eficiencia de los aerogeneradores

En la gráfica 8, se muestra la generación de potencia de cada una de las cuatro aerogeneradores seleccionados. Es notable que el modelo H-80 llega casi a duplicar al modelo siguiente, el H-40 en las velocidades de viento más frecuentes en cualquier localidad que son desde las 3 m/s hasta las 9 m/s, vientos más elevadas son, de hecho, raras y poca comunes.

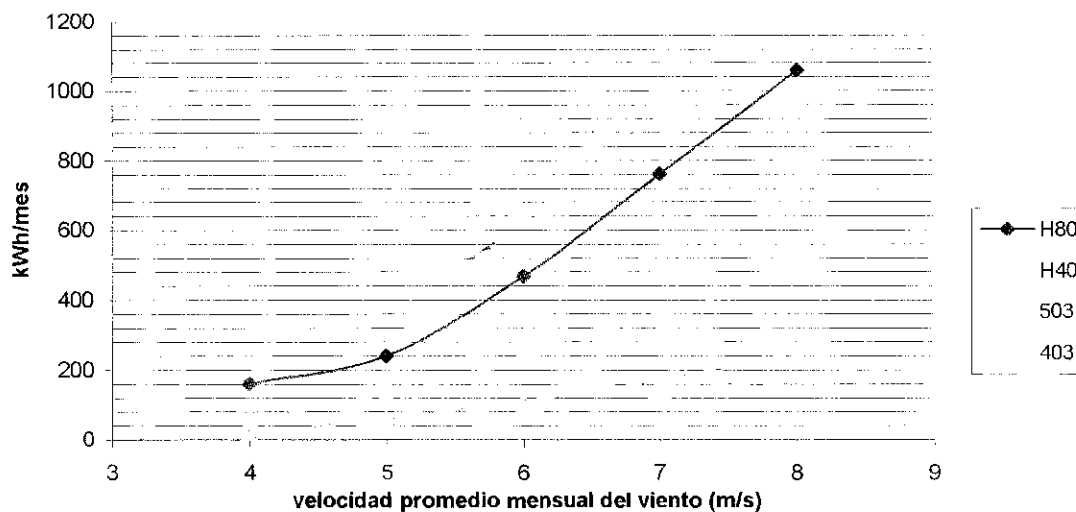


En la gráfica 9 se calculó la eficiencia de cada modelo según su curva de potencia y la potencia teórica para distintas velocidades de viento. Esta gráfica pudiera sugerir que la mejor opción de adquisición sea el modelo 403, pero es necesaria tomar también los aspectos económicos a la hora de tomar la decisión de que aerogenerador sea el más conveniente.



La gráfica 10 muestra la generación de potencia en kWh, producidos en un mes por cada una de los modelos seleccionados. Hay que hacer notar que en esta gráfica se tomaron en cuenta velocidades de viento promedio mensuales corregidas por un parámetro de forma de Weibull  $k = 2$ .

**Gráfica 10. Generación mensual estimada**



## 8.3 Análisis Económico

Con el fin de determinar si es rentable la adquisición de un aerogenerador residencial es indispensable tomar en cuenta, adicionalmente a las velocidades del viento promedio, los siguientes factores, que se utilizan en el análisis económico;

### 8.3.1 Precio del kWh de la compañía de electricidad

En Ciudad San Cristóbal se están aplicando dos tarifas a los consumidores, las cuales son dependientes del consumo individual de cada residencia. Estos precios se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 9. Cuotas en US\$ / kWh (cambio al 7.81 por dollar)

Consumo mensual (kWh)	Cuota asignada (en US\$/kWh)
< 300	0.123
≥ 300	0.231

En esta tesis se utiliza únicamente la cuota para consumos mayores a 300 kWh /mes. Justificado por el hecho de que en la zona de estudio, las residencias son en su mayoría de tamaño mediano o grande y con consumos de 400 a 600 kWh/mes. Y también por el hecho de que en residencias con consumos inferiores a los 300 kWh/mes, un aerogenerador sería una inversión innecesaria y poco rentable como se observará en la tabla siguiente.

### 8.3.2 Tasa de interés

Debido a que el costo de esta inversión ronda entre los U\$ 1,000.<sup>00</sup> y U\$ 5,000.<sup>00</sup>, se supone que el inversionista dispone del dinero para iniciar el proyecto. Por lo que se hará el análisis comparándolo con la tasa de interés de un banco para cuentas de ahorro a plazo fijo que es de  $i = 5\%$ , tarifa aplicable en el Banco Industrial.

### 8.3.3 Precios y vida útil del sistema

Los aerogeneradores están diseñados para funcionar con el mínimo de mantenimiento y con una vida útil de 20 años, el banco de baterías requiere de una supervisión más frecuente y su vida útil es de ocho años, dependiendo del mantenimiento que se resume a supervisión de niveles y de no permitir sobrecargas o descargas.

Tabla 10. Precios de componentes para instalación de sistema eólico (US Dólares)

	H80	H40	503	403
<b>Turbina</b>	3,400	2,500	1,050	680
<b>Baterías</b>	1,000	750	500	250
<b>Inversor</b>	430	430	90	60
<b>Cables</b>	150	150	40	40
<b>Poste 25m e instalación</b>	200	200	70	70
<b>TOTAL</b>	<b>\$5,180</b>	<b>\$4,030</b>	<b>\$1,750</b>	<b>\$1,100</b>

El procedimiento para determinar si la inversión es rentable fue el siguiente:

- Se obtiene el valor anualidad del costo mensual con una tasa del 5% con ayuda de un ordenador.
- Se obtiene la cantidad de kWh producidos en un mes.
- Se dividen y se obtiene el valor por kWh producido por el aerogenerador

Modelo	Anualidad (mensual)
H80	\$40.25
H40	\$31.14
503	\$14.58
403	\$8.77

Tabla 11. Valor de Anualidad para cada modelo (períodos mensuales, 20 años).

Tabla 12. Generación mensual según velocidad de viento promedio para cada modelo (kWh/mes)

m/s	4.00	4.25	4.60	4.75	5.00	5.25	5.50	5.75	6.00	6.25	6.50	6.75	7.00	7.50	8.00
H 80	147	148	169	184	218	260	309	364	423	486	552	619	688	825	957
H 40	50	55	86	98	120	141	163	184	208	234	258	286	315	380	450
503	17	26	40	46	55	66	77	88	100	112	126	140	155	189	228
403	10	12	26	31	39	48	55	63	72	80	89	98	108	129	153

La Tabla 13 demuestra de una forma muy simple el costo de cada kWh producido por cada aerogenerador dependiendo del modelo y de la velocidad del viento promedio. Están sobresaltados, con amarillo, los valores en los cuales el costo al que producen los aerogeneradores es menor que el precio al que vende la compañía eléctrica.

Tabla 13. Precio del kWh producido por cada modelo (en US Dólares)

m/s	4	4.25	4.6	4.75	5	5.25	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7	7.5	8
H 80	0.274	0.273	0.238	0.218	0.185	0.155	0.130	0.111	0.095	0.083	0.073	0.065	0.058	0.049	0.042
H 40	0.621	0.563	0.362	0.317	0.261	0.220	0.191	0.169	0.149	0.133	0.121	0.109	0.099	0.082	0.069
503	0.863	0.558	0.365	0.316	0.264	0.221	0.190	0.166	0.146	0.130	0.116	0.104	0.094	0.077	0.064
403	0.873	0.714	0.336	0.286	0.224	0.184	0.159	0.139	0.122	0.110	0.098	0.089	0.081	0.068	0.057

### 8.3.4 Relación costo beneficio

Por ultimo se muestra la gráfica 11, para determinar y comprender de forma visual en qué velocidades de viento es más rentable la inversión de un aerogenerador.

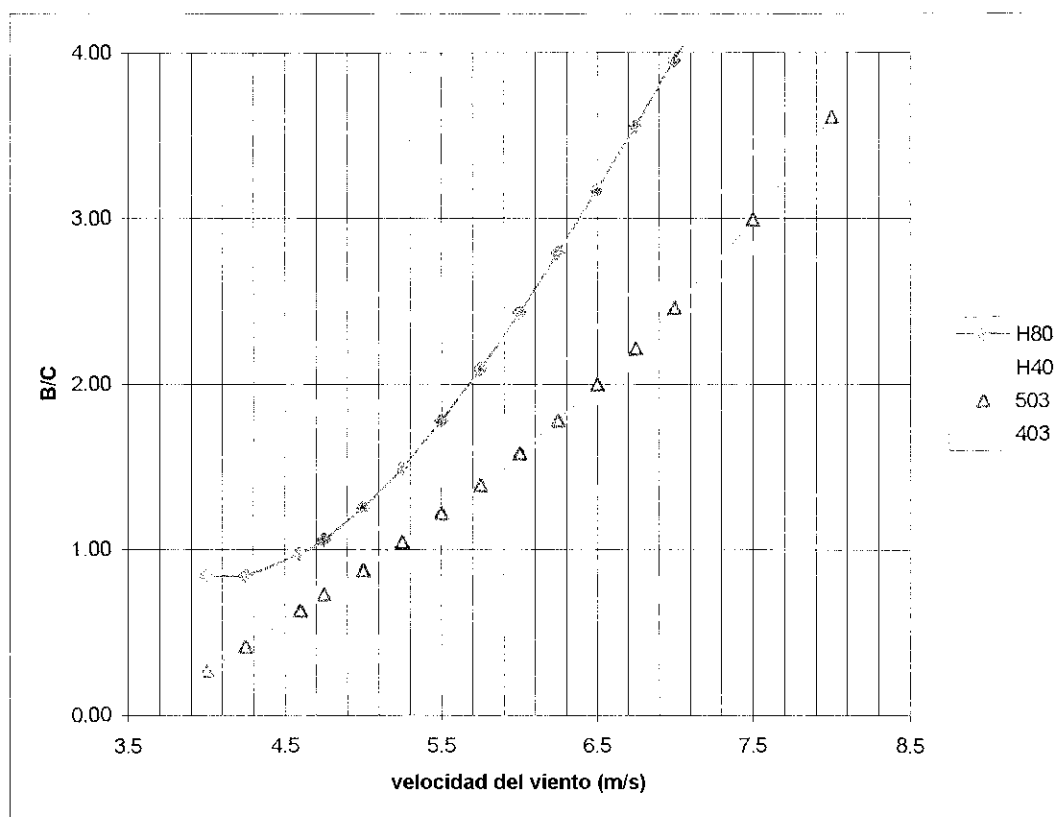
La forma de interpretar esta gráfica es muy simple, si el valor está por debajo de uno (1), significa que es más caro producir que comprar, si este valor lo supera, significa que es mas barata producir la energía eléctrica.

La forma de obtener estos valores es igual de sencilla; simplemente se divide el valor del precio de venta del kWh de la compañía eléctrica dentro del costo al cual están generando los aerogeneradares.

$$\text{Ej: } \frac{\text{BENEFICIO}}{\text{COSTO}} = \frac{\$0.231}{\$0.185} = 1.25$$

Esto significa que es un 11% más económico producir la electricidad que comprarla.

Gráfica 11. Relación costo beneficio



Analizando el gráfico anterior, se desprende que para aquellas sitios geográficos cuya velocidad media anual, al menos supere los 5.2 m/s, generar electricidad mediante un sistema conversor de energía eólica será más económico que mediante la compra a la compañía eléctrica. Considerando luego un mapa eólico de una determinada región podemos establecer zonas de mayor o menor conveniencia económico-financieras para la instalación de un sistema conversor de energía eólica para generación eléctrica, para la aplicación ya definida.

El motivo por el cual se hicieron comparaciones únicamente con la compra de electricidad brindada por la compañía eléctrica es porque el costo de las celdas fotovoltaicas es mucho mayor. A continuación se muestra una tabla comparativa de los precios de estas celdas con los de los aerogeneradores. Para producir la misma cantidad de kWh/mes necesarios para que estos aerogeneradores fueran rentables.

Tabla 14. Comparación de costos entre sistema eólico y fotovoltaico

<b>kWh/mes</b>	<b>Sistema eólico</b>	<b>Sistema fotovoltaico</b>	<b>Diferencia</b>	<b>% mas caro</b>
<b>220</b>	\$ 5,180.00	\$ 7,978.00		
<b>160</b>	\$ 4,030.00	\$ 6,076.00		
<b>77</b>	\$ 1,750.00	\$ 2,903.00		
<b>48</b>	\$ 1,100.00	\$ 1,782.00		

La diferencia es sumamente mayor en todos los casos es al menos un 50% más caro adquirir un sistema fotovoltaico que un eólico.

Pero cabe mencionar que la combinación de ambos sistemas llega a resultar muy eficiente en lugares en donde durante épocas del año, la velocidad del viento es muy baja y las horas efectivas de la luz solar son mayores.

## IX. CONSIDERACIONES ADICIONALES AL USO DE ENERGÍA EÓLICA

El potencial eólico en Guatemala no está incentivado, desde el hecho de que no existen mapas eólicos nacionales hasta que, como en otros países, el producir energía eléctrica proveniente de un recurso renovable, se premia con mejores tarifas e impuestos más atractivos para el inversionista. En el país no hay un solo aerogenerador que produzca más de 10kWh, ni parques eólicos conectados a la red. Se ha llegado a unas pocas aplicaciones en el área rural, sin embargo no se han difundido las ventajas a largo plazo de estos sistemas.

Los siguientes párrafos han sido extraídos del libro "Principios de conversión de la energía eólica" (Holman, 1997: 125) y fueron incluidos en el presente trabajo debido que se consideran fundamentales para una completa interpretación de las rentabilidades asociadas a un sistema de generación eléctrica por medio del aprovechamiento del viento.

"Los costos de este tipo de energía pueden considerarse desde distintos puntos de vista. Uno de estos son los costos privados, de interés para el inversionistas y consistentes en los descritos el apartado anterior. Ahora, observando la instalación de un sistema conversor de energía eólica desde un punto de vista público o social, intervendrán además en la determinación de la rentabilidad del proyecto otros factores como el ahorro de combustible que se produce, el valor de capacidad que aporta al sistema de distribución, los beneficios medioambientales, etc. Centraremos nuestros comentarios en este tipo de costos, difícilmente cuantificables pero no menos importantes a la hora de adoptar una política energética conservacionista. Algunos de éstos son conocidos como beneficios externos o externalidades de un proyecto de inversión.

Las externalidades son fallos en el mercado producidos cuando una actividad económica produce costos o beneficios en otra actividad, o en la sociedad, sin que éstos se reflejen en el precio del producto. Para lograr una asignación óptima de recursos, estos beneficios deberían ser cuantificados en términos monetarios e incorporarse al precio que se paga por la energía eólica. Esto se llama internalizar las externalidades. Veamos algunas de estas."

"*Ahorro energético*: la introducción de un sistema de energía eólica supone un ahorro en el consumo de recursos no renovables. Teóricamente por cada kWh generado a partir de una alternativa energética renovable se ahorraría el combustible para generar la misma cantidad. Sin embargo, debido al carácter intermitente de la energía eólica y a la mayor eficiencia de las unidades convencionales, esta reducción puede ser menor. En cualquier caso este aspecto debe ser siempre tenido en cuenta."

*"Valor de capacidad:* una instalación eólica puede sustituir inversiones en nuevas plantas de generación convencional y por lo tanto tendrá un valor de capacidad. Se puede decir que la potencia firme disponible es igual a la potencia media anual. Si esto se tuviera en cuenta haría que el término de potencia con que se retribuye la energía eólica aumentara hasta situarse al nivel del de las energías no renovables, al considerarse su potencia igual de valiosa que la de otras instalaciones. En el caso de una participación sustancial de la energía eólica el valor de capacidad tendería a ser nulo ya que no sustituiría nuevas inversiones. El valor de capacidad será mayor cuando el régimen de vientos sea más estable y cuando el resto del sistema de generación menos fiable. En Holanda se ha calculado un valor para 1000 MW de energía eólica de 165-184 MW de capacidad convencional. En términos monetarios esto equivale a 0,008 US\$/kWh. "

*"Externalidades socioeconómicas:* los más evidentes son la creación de empleo y el ahorro de divisas, en el caso que la tecnología utilizada sea de producción nacional. Estos beneficios no han sido aún valorados económicamente de forma fiable para la energía eólica, aunque se consideran de gran importancia, especialmente la creación de empleo."

*"Externalidades medioambientales:* asimismo la sustitución de energías convencionales por eólica produce una serie de beneficios en el medioambiente que deberían ser tenidos en cuenta en el precio de la energía. Se han obtenido valores para la sustitución del carbón, están alrededor de la 0,04 US\$/kWh. Esta cantidad debería ser incluida, bien como una prima en el precio de la eólica, o como un impuesto en el precio del carbón, de tal forma que se incorporen los diferentes efectos medioambientales que presentan al ser comparados como alternativas de generación eléctrica."

"La existencia de todos estos beneficios sociales de este tipo de aprovechamiento energético ha hecho que muchos gobiernos europeos, y de otras regiones, hallan desarrollado una serie de incentivos económicos en los que se los intenta incorporar, de una u otra forma o estrategia. Estos incentivos han contribuido a crear mercados atractivos para los inversionistas, lo que a su vez ha colaborado en la reducción de los costos de la energía eólica. "

"Los incentivos económicos, idealmente, deberían estar dirigidos a corregir el fallo del mercado producido por las externalidades medioambientales y socioeconómicas. Sin embargo la dificultad de evaluarlas económicamente hace que la determinación de los incentivos sea más bien una decisión política. Esto, en algún caso, podría conducir a un desarrollo artificial de la energía eólica, tal como sucedió en los primeros años en los Estados Unidos de América con las rebajas fiscales. De este modo hubo un abandono generalizado de los parques cuando desaparecieron estas medidas, ya que no resultaban rentables sin ellas. "

“En Europa parece que los incentivos están facilitando un crecimiento sostenido de esta energía, a través de distintos instrumentos. La bonificación del precio de venta de la energía es actualmente el marco más utilizado y el que se ha revelado como más efectivo y eficiente desde un punto de vista económico. Además, existen otros como subvenciones a la instalación, ventajas fiscales, acceso a préstamos en condiciones ventajosas.”

## X. CONCLUSIONES


- Las condiciones geográficas en el Sector B1 de Ciudad San Cristóbal posibilitan la utilización de la energía eólica para producir electricidad.
- El beneficio económico es proporcional a la velocidad del viento promedio, por lo que la rentabilidad del sistema eólico depende del estudio previo de la localidad. En Ciudad San Cristóbal existen lugares en donde la velocidad del viento permite un alto beneficio económico.
- La energía producida por sistemas eólicos es menos costosa que la producida por sistemas fotovoltaicos. Y debido a que en Ciudad San Cristóbal hay un promedio anual de vientos relativamente estable, el sistema fotovoltaico es menos eficiente con relación a su precio.
- La producción de energía en 20 años con un aerogenerador residencial puede alcanzar los 50MW. Lo que implica una disminución considerable a la contaminación del medio ambiente, otorgada por un solo aerogenerador.
- El carecer de un mapa eólico dificulta el estudio de factibilidad para instalar un sistema eólico de producción de electricidad, conllevando a la falta de explotación de un recurso disponible, el que implicaría fuentes de trabajo, economías tanto familiares como industriales y ahorro de las fuentes tradicionales de energía, tales como el petróleo.
- Las aplicaciones que se les puede dar a los sistemas de conversión de energía eólica son varios, por ejemplo para bombas de agua, molinos trituradores para la industria de polvos, el Nixtamal entre otros.



# Anexo 1

## Factura de la empresa eléctrica para sector B1 se Cd. San Cristóbal

Nota: esta factura no está afectada por el incremento del 9% sobre la cuota (antes de la tasa municipal), ya que se emitió antes que aplicara la nueva ley.

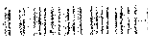

**Municipio de San Cristóbal de las Casas**  
 Calle de la Libertad No. 100  
 San Cristóbal de las Casas, Chiapas  
 C.P. 30700

**CLIENTE**  
 Nombre: [Faded text]  
 Calle: [Faded text]  
 No. [Faded text]  
 Colonia: [Faded text]  
 C.P. [Faded text]

**FACTURA**  
 Fecha de Emisión: [Faded text]  
 Fecha de Consumo: [Faded text]  
 Consumo: [Faded text] kWh  
 Tasa: [Faded text] \$/kWh  
 Valor: [Faded text] \$

Consumo Energía	658.07
Consumo Gas PVA (12%)	398.48
Imp. Municipal San Cristóbal de las Casas	193.36
Procesamiento y distribución de energía eléctrica	0.00
<b>CARGOS DEL MES</b>	<b>1250.91</b>
Saldo anterior de 01 mes	679.07
Saldo anterior de 02 meses	0.00
Saldo anterior	679.07
<b>TOTAL A PAGAR</b>	<b>1930.98</b>

**FORMA DE PAGO**  
 Cuenta de Débito: [Faded text]  
 Cuenta de Crédito: [Faded text]  
 Cuenta de Ahorro: [Faded text]  
 Cuenta de Corriente: [Faded text]


 Fecha de Emisión: [Faded text]      Fecha Límite de Pago: [Faded text]      Total a Pagar: [Faded text]