# GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PEQUEÑA ESCALA CON ENERGÍA EÓLICA

# Programa Teórico de Entrenamiento





Centro de Conservación de Energía y del Ambiente CENERGIA



Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial SENATI



Energía y Medio Ambiente ECOFYS Utrecht – Holanda

# GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PEQUEÑA ESCALA CON ENERGÍA EÓLICA

Programa Teórico de Entrenamiento

# GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PEQUEÑA ESCALA CON ENERGÍA EÓLICA

# Programa Teórico de Entrenamiento

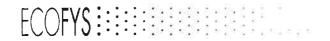
SENATI
CENERGIA
ECOFYS
Utrecht/Lima 1999

Este manual ha sido elaborado por:

Ing. Carlos Orbegozo (CENERGIA)
Ing. Bob Schulte (ECOFYS)
Ing. Dick Veldkamp (Desarrollo de
Energías Renovables)

Dibujos: Amerentske Koopman

# Manual publicado por:





# Energía y Ambiente

Centro de Conservación de Energía y del Ambiente

Kanaalweg 16-G 3526 KL Utrecht Holanda Calle Deraín 198 San Borja – Lima 41 Perú

Todos los derechos reservados. Prohibida su reproducción parcial o total por impresión, fotografía, microfilm o por cualquier otro medio, sin autorización escrita de los editores.

Esta publicación ha sido posible gracias al aporte económico de la *Fundación Hulsebosch Prior*, Holanda.

La información contenida en esta publicación ha sido recopilada con el mayor cuidado en cuanto a su legitimidad. Sin embargo, tanto los editores como los autores quedan exentos de toda responsabilidad legal por cualquier daño o perjuicio producido como consecuencia de la aplicación de los métodos en ella descritos.

# CONTENIDO

INT	RODUC	CIÓN PA	ARA LOS ESTUDIANTES	9
1.	INTR	RODUCC	CIÓN, RECURSOS Y COMPONENTES	11
	1.1		ia y aplicaciones de la energía eólica	
	1.2		nergía eólica es para usted?	
	1.3		lidades y limitaciones de los sistemas eólicos	
2.	REC		EÓLICOS	
	2.1		ucción	
	2.2		de la velocidad del viento	
	2.3	Unida	des	23
	2.4		mentos de medición	
	2.5	¿Cómo	o se mide la velocidad del viento?	31
	2.6		nda en los datos registrados	
	2.7	Distrib	bución de la velocidad del viento	39
	2.8		ama de flujo	
3.	COM	(PONEN	ITES DE LA ENERGIA EOLICA	42
	3.1			
		3.1.1	Características del rotor	45
		3.1.2	Producción	46
		3.1.3	Dos preguntas comunes	
		3.1.4	Fuerzas en el rotor	
	3.2	Sisten	nas de control y seguridad	
		3.2.1	Generalidades	
		3.2.2.		
		3.2.3	Problemas comunes	
	3.3	Gener	ador	
	0,0	3.3.1	Generalidades	
		3.3.2	Generadores de imanes permanentes	
		3.3.3		
	3.4		as	
		3.4.1	Generalidades	
		3.4.2	Principios de operación	
		3.4.3	Características	
	3.5		onentes electrónicos	
	3.5	3.5.1	Controlador de voltaje	
		3.5.2	Inversor	
		3.5.3	Balastro (dump load)	
		3.5.4	Cables	
	3.6		Caules	
	5.0	3.6.1	Introducción	
		3.6.2	Tipos de torre	
	27		le engranajes	
	3.7	Caja o	ie engranajes	03

4.	DISE	ÑO DE UN SISTEMA EÓLICO	66				
	4.1	Introducción					
	4.2	Demanda de energía	67				
		4.2.1 Consumo de electricidad de dispositivos	67				
		4.2.2 Patrón de consumo de energía	68				
	4.3	Suministro de energía	71				
		4.3.1 Cálculo sencillo de la salida (producto de salida)	71				
		4.3.2 Cálculos mejorados de la salida	71				
	2	4.3.3 Estimación de los datos de velocidad de viento	76				
		4.3.4 Resumen					
	4.4	Almacenamiento	81				
		4.4.1 Consideraciones generales					
	4.5	Cálculos con el patrón de consumo diario	83				
	4.6	¿Cómo se selecciona un aerogenerador?: Recomendaciones	87				
		4.6.1 Funcionamiento					
		4.6.2 Generalidades					
		4.6.3 Resumen	89				
	4.7	Miscelánea					
	9						
5.	EXPE	RIENCIA CON AEROBOMBAS Y AEROGENERADORES EN EL P	ERÚ91				
	5.1	Historia	91				
	5.1.1 Sistema modular de uso comunal: experiencia Antioquía						
		Huarochirí, Lima	93				
		5.1.2 Sistema modular de uso comunal: experiencia de Racracanch	ıa -				
		Cerro de Pasco	94				
	5.2	Potencial de aplicación de la energía eólica en el Perú	94				
	5.3	Principales proveedores de equipos de energía eólica en el Perú	95				
	BIBLI	OGRAFIA	97				
		•					
	ANEX	KO A: ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA ENERGÍA EÓLICA	99				
	<b>A</b> .1	Costos de la generación de electricidad	101				
	A.2	Cálculo de los costos de inversión para aerogeneradores	101				
	A.2.1	Aerogeneradores pequeños	101				
	A.2.2	Aerogeneradores grandes (100 kW a más)	102				
	A.2.3	Baterías	102				
	A.2.4	Componentes electrónicos	102				
	A.2.5	Artefactos	102				
	A.3	Costos de la electricidad	102				
	A.3.1	Aerogeneradores	103				
	A.3.2	Equipos diesel	104				
ANE	XO B: E	SCALA DE BEAUFORT	107				
	Criteri	ios de evaluación para la Escala de Beaufort	110				
ANE	XO C: D	ENSIDAD DEL AIRE	111				

#### INTRODUCCIÓN PARA LOS ESTUDIANTES

El curso, Generación de electricidad a pequeña escala con energía eólica, ha sido diseñado especialmente para ser desarrollado en programas dirigidos a electricistas, electrotécnicos y mecánicos de las escuelas técnicas de nivel intermedio del SENATI en el Perú. En él se tratarán los aspectos teóricos y prácticos de la generación de electricidad.

Su objetivo principal es poner a disposición de los estudiantes el conocimiento básico acerca de los fundamentos de la tecnología del aerogenerador y sus aplicaciones, mediante un enfoque práctico, desarrollando únicamente los puntos más relevantes del aspecto teórico del tema. De este modo, al finalizar el curso, el alumno habrá adquirido el conocimiento clave relacionado con esta tecnología, sus posibilidades, restricciones y aplicaciones; y, a su vez, estará capacitado para dimensionar, instalar, inspeccionar y dar mantenimiento a pequeños aerogeneradores. Asimismo, aprenderá a realizar mediciones y a detectar errores en un sistema.

El curso está dividido en dos partes. La primera estará dedicada a la teoría de la energía eólica, e incluirá ejercicios prácticos de los temas tratados. Una vez finalizada, se dará paso a la segunda parte del curso, en la que se llevará a cabo un taller práctico.

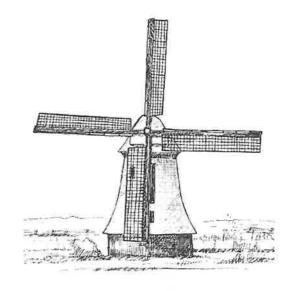
Para finalizar, cabe mencionar que éste es uno de cuatro cursos consagrados a las Energías Renovables: Energía Solar Fotovoltaica, Energía Solar Térmica (termas solares), Energía Eólica y Microcentrales Hidroeléctricas.

# 1. INTRODUCCIÓN, RECURSOS Y COMPONENTES

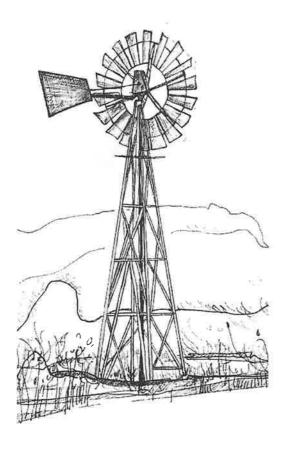
# 1.1 Historia y aplicaciones de la energía eólica

Los molinos existen desde hace mucho tiempo. Incluso, hace unos 2,000 años atrás, ya se utilizaba el molino de vela de Creta.

Figura 1.1 Molino de viento holandés

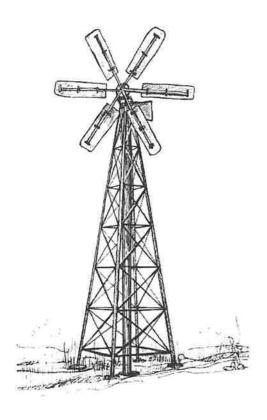


Los molinos más utilizados hoy en día son los de propulsión:



Molinos multipala de tipo americano (girasol) para bombeo de agua: Estos molinos son construidos para durar por décadas. El diámetro del rotor va desde 1 a 8 metros, el número de palas es de 16 a 32, y su potencia es hasta de unos cuantos cientos de Watts. Trabajan a bajas velocidades (coeficiente de velocidad lambda,  $\lambda = 1$ ). Actualmente, existen más o menos unos 10,000 alrededor del mundo. Aún se fabrican en países como Argentina, Estados Unidos y Australia.

Figura 1.2 Molino multipala de tipo americano

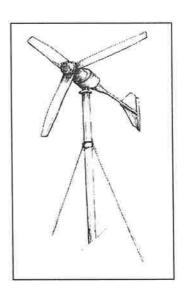


Cargadores eólicos: Estos son máquinas rápidas y modernas. El diámetro del rotor oscila entre 1 y 7 metros y genera una potencia de hasta 10 kW. Hasta el momento se han vendido alrededor de diez mil cargadores. Sirven para aplicaciones autónomas que requieren poca energía como refrigeradoras, sistemas de alumbrado, bombas de agua eléctricas, telecomunicaciones, etc.

Molinos modernos para bombeo de agua: Con el fin de ahorrar dinero, por lo general son más livianos y giran más rápido (coeficiente de velocidad lambda,  $\lambda = 1.5 - 4$ ), y el número de palas es menor (entre 4 y 8). Probablemente se han construido miles de ellos.

Figura 1.3 Aerobombas modernas

Figura 1.4 Cargador eólico



Aerogeneradores grandes, también llamados SCEE (WECS en inglés): Son Sistemas de Conversión de Energía Eólica (SCEE) de 100 a 1,000 kW, generalmente acoplados a una red eléctrica. Revisar la tabla 1.1 para tener una idea general.

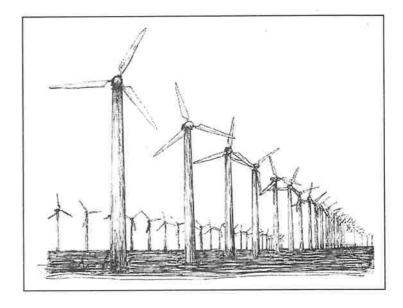


Figura 1.5 Bosque eólico

Tabla 1.1 Desarrollo de la energía eólica. Capacidad instalada con potencia en megawatts (MW). Para calcular el número de turbinas, multiplique el número en MW por 3 - 4. Por lo tanto, el número de turbinas en el mundo a fines de 1994 fue de 11,000 a 15,000

AREA	1990	1991	1992	1993	1994	1995*
América del					1,725	1,815
Norte USA & Canadá					1,725	1,815
América del Sur					10	30
Europa	471	666	883	1,253	1,724	2,360
Alemania	60	110	175	326	632	982
Dinamarca	343	413	458	487	539	609
Reino Unido	8	12	50	130	171	221
Holanda	40	83	106	132	162	212
Medio Oriente África					38	48
Asia					231	481
- India					201	401
- China					30	80
Australia					13	18
EL MUNDO					3,754	4,722

(\*) Estimado

Fuente: ECOFYS - Holanda

Si toda la información precedente es registrada en una tabla, se obtiene:

 Tabla 1.2:
 Aerogeneradores importantes

Tipo	Americano	Nuevo diseño	Cargador eólico	WECS	
Uso	Bombe	o de agua	Generación de electricidad		
Diámetro Rotor (m)	2 – 8	2 – 8	1 – 7	10 – 60	
Número de Palas	12 – 32	4 – 8	2 – 3	2-3	
Altura de torre (m)	6 – 15	6 – 15	4-20	20 – 60	
Potencia	hasta 300 W	hasta 300 W	hasta 10 kW	hasta 1 MW	
Material	acero	Acero	acero poliéster	madera plástico	

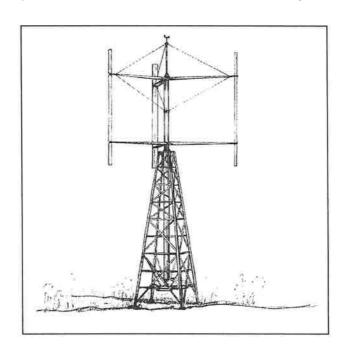
# Ejercicio 1.1:

Una turbina típica tiene una potencia de 600 kW. ¿Cuál es el tamaño de su torre y de su rotor?

- a) 12 15 m
- b) 27 29 m
- c) 42 47 m
- d) 60 64 m

Esto no significa que otros tipos de aerogeneradores no sean útiles, por ejemplo el aerogenerador Darrieus, que posee un eje vertical (vea la figura 1.6).

Figura 1.6: Molino Darrieus alternativo (giromill)



Sin embargo, después de haber probado con una enorme cantidad de tipos de molino, el aerogenerador de propulsión ha demostrado ser el mejor (por esa razón son tan populares en el mundo entero); lo que quiere decir que si alguien trata de venderle un aerogenerador que no sea del tipo de propulsión tiene derecho a desconfiar (Pida un récord: ¿Cuántos de esos aerogeneradores se han instalado y dónde?, ¿La curva de potencias ha sido calculada por un instituto independiente?, etc.)

Figura 1.7: Características de varios molinos

TIPO DE ROTOR	Inclinación/Margen de inclinación	Ср	RPM	Torque	Carga típica
Hélice (elevación)	6 a 10 (hasta 20)	0.42	Alto	Bajo	Generador eléctrico
Darrieus (elevación)	5 a 6	0.4	Alto	Bajo	Generador eléctrico
Ciclogiro (elevación)	3 a 4	0.45	Moderado	Moderado	Generador eléctrico o bombeo
Multipala Chalk (elevación)	3 a 4	_0.35	Moderado	Moderado	Generador eléctrico o bombeo
Hélice marina (elevación)	4	0.35	Moderado	Moderado	Generador eléctrico d bombeo
Tipo ventilador (arrastre)	1	0.30	Вајо	Alto	Bomba
Savonius (arrastre)	1	0.15	Bajo	Alto	Bombeo
Tipo holandes (arrastre)	2 a 3	0.17	Вајо	Alto	Bombeo de piedra de molino

# 1.2 ¿La energía eólica es para usted?

Antes de decidirse a usar la energía eólica, Ud. deberá pensarlo muy bien. A pesar de que la energía eólica es una tecnología renovable y amigable al ambiente, un motor diesel podría ser simplemente más barato. ¡O quizás no hay posibilidades de mantenimiento a molinos!. Si está pensando en utilizar energía eólica, debe considerar cuidadosamente los siguientes rubros:

Figura 1.8



# Velocidad promedio del viento

Dado que la cantidad de energía en el viento es proporcional al cubo de la velocidad del viento, es muy importante conocer la velocidad del viento para saber si la energía eólica es económica. La tabla 1.3 presenta una relación general.

Tabla 1.3: Indicación de la viabilidad de la energía eólica

Velocidad promedio anual del viento a 10 m sobre el nivel del suelo	Posibilidades de usar la energía eólica			
Posibilidades de usar la energía eólica  Por debajo de 3 m/s  3 - 4 m/s  Podría ser una opción para aerobombas, pero no para aerogeneradores.  4 - 5 m/s  Mayor que 5 m/s  Posibilidades de usar la energía eólica  Posibilidades de usar la energía eólica  No muy factible, a menos que existan circunstancias especiales  Podría ser una opción para aerobombas, pero no para aerogeneradores.  Las aerobombas podrían competir con los equipos diesel, aerogeneradores autónomos pueden ser una opción  Factible, tanto para aerobombas como para aerogeneradores				
3 - 4 m/s	Podría ser una opción para aerobombas, pero no para los aerogeneradores.			
4 - 5 m/s	Las aerobombas podrían competir con los equipos diesel, los aerogeneradores autónomos pueden ser una opción			
• •	Factible, tanto para aerobombas como para aerogeneradores			
• •	Factible para aerobombas, aerogeneradores autónomos y conectados a red.			

#### Suministro y demanda

Las reglas dadas anteriormente pueden usarse para obtener un primer cálculo de la potencia promedio del viento, la que puede compararse con la demanda de potencia. Si hay suficiente potencia sobre la base de un año, entonces debe hacerse el análisis por meses. ¿Cuáles son las variaciones del suministro y la demanda a lo largo de los meses?. ¿Los patrones son similares?. ¿Si no son similares, que sucedería durante el mes más crítico?. ¿Qué cantidad de almacenamiento se requiere?. No olvide que un almacenamiento de más de unos cuantos días es, por lo general, poco factible en términos económicos.

### Infraestructura de mantenimiento

¿Qué sucede si un aerogenerador se malogra?. ¿Hay los repuestos disponibles?. ¿Hay un taller a una distancia razonable?.

#### Familiaridad con el viento

Es importante saber si las personas están familiarizadas con la energía eólica (y electricidad). Si no lo están, se deberá poner mucho interés en explicar los puntos esenciales necesarios para evitar que el proyecto falle.

#### Otras opciones

Uno siempre debe fijarse en otras opciones. Tal vez la energía eólica no sea una buena idea, bajo ciertas circunstancias.

#### Ejercicio 1.2:

Piense en todas las actividades de la vida diaria que requieren del uso de energía. ¿En cuáles emplearía energía eólica?

#### Ejercicio 1.3:

Examinando las condiciones necesarias para el uso de energía eólica, determine cuáles son las regiones del Perú donde ésta sería una buena opción. Si pudiera escoger, ¿dónde abriría un negocio de venta de aerogeneradores?

# 1.3 Posibilidades y limitaciones de los sistemas eólicos

Un primer paso para evaluar la posibilidad de aplicar la energía eólica es analizar sus ventajas y desventajas.

Las principales ventajas de la energía eólica son:

- 1) La energía eólica no cuesta.
- 2) Hay una gran experiencia en el uso de molinos mecánicos (100 años). Además, el uso de los molinos modernos también está incrementándose.
- 3) Los aerogeneradores operan automáticamente y requieren poco mantenimiento.
- 4) Los aerogeneradores están diseñados para 15 20 años durante los cuales no se necesita inversión alguna.

- 5) La tecnología de fabricación puede ser adaptada parcial o totalmente a cualquier país (por ejemplo, las torres o cabezas del aerogenerador). Se está produciendo gran cantidad de aerogeneradores en coyunturas aventuradas.
- 6) No se produce ni dióxido de carbono ni productos tóxicos.
- 7) Los aerogeneradores vienen en cualquier potencia desde 50 W hasta 1 MW.

# Las principales desventajas son:

- 1) Los WECS grandes no pueden estar muy alejados de la red (máximo a 100 km) y la conexión a la red es costosa.
- 2) El suministro de potencia varía notablemente y el almacenamiento siempre es necesario. Un depósito de agua o unas baterías pueden servir de almacenes. En el caso de los WECS acoplados a una red, ésta se usa como lugar de almacenamiento.
- 3) En períodos con bajas velocidades de viento, el aerogenerador puede resultar insuficiente para satisfacer la demanda. En algunos casos, es necesario emplear sistemas de apoyo (generadores diesel, bombas manuales), lo que incrementa los costos.
- 4) En muchas zonas, el mercado potencial no es lo suficientemente grande como para sostener la ingeniería y equipos.
- 5) Como en el caso de todas las tecnologías de energías renovables, la inversión inicial es algo elevada. Esto podría presentar a los aerogeneradores como equipos poco atractivos para los clientes, aún cuando representan ahorro a largo plazo (10 - 20 años).
- 6) Los WECS grandes son máquinas complicadas de alta tecnología. La producción e instalación requiere mucha habilidad y equipo especializado.

# Eiercicio 1.4:

Examine el listado de puntos fuertes y débiles de la tecnología eólica. ¿Cómo podrían reforzarse los puntos débiles?

# 2. RECURSOS EÓLICOS

#### 2.1 Introducción

En resumen, la energía eólica es energía solar. El sol provoca diferentes temperaturas en el aire que rodea a la tierra, lo que origina que haya regiones con baja y alta presión. Estas zonas de presión, junto con el movimiento rotativo de la tierra, crean los principales sistemas de viento.

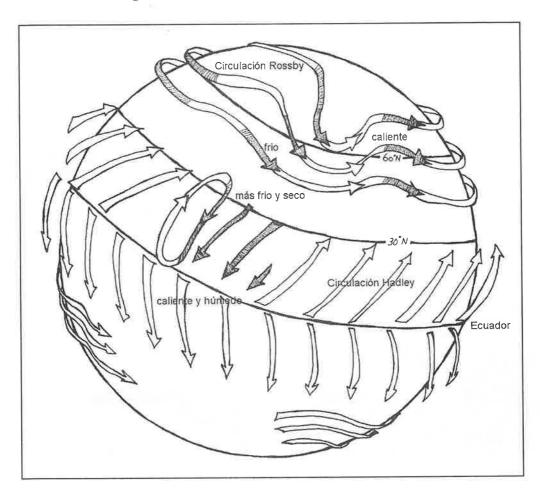
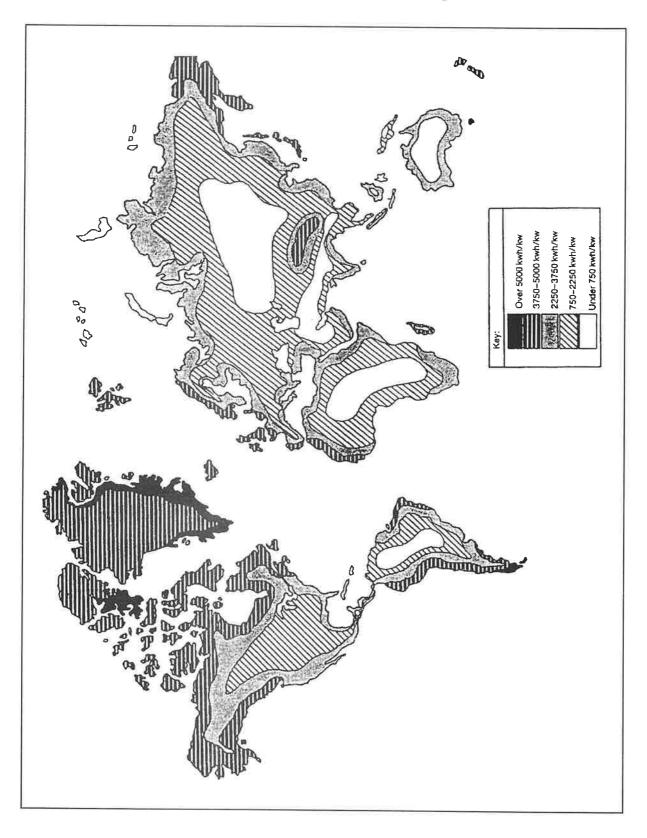


Figura 2.1: Circulación mundial del viento [1]

En este curso la velocidad del viento se acepta como es. Para tener una idea de la velocidad del viento, se ha incluido un mapa mundial eólico (figura 2.2) y uno de América del Sur (figura 2.3). Lamentablemente, estos mapas sólo dan una idea general y por lo tanto, son inaplicables para determinados lugares por la influencia del terreno local. Si se requiere una evaluación exacta de la potencia eólica disponible, entonces será necesario realizar mediciones, especialmente en el caso de terrenos montañosos.





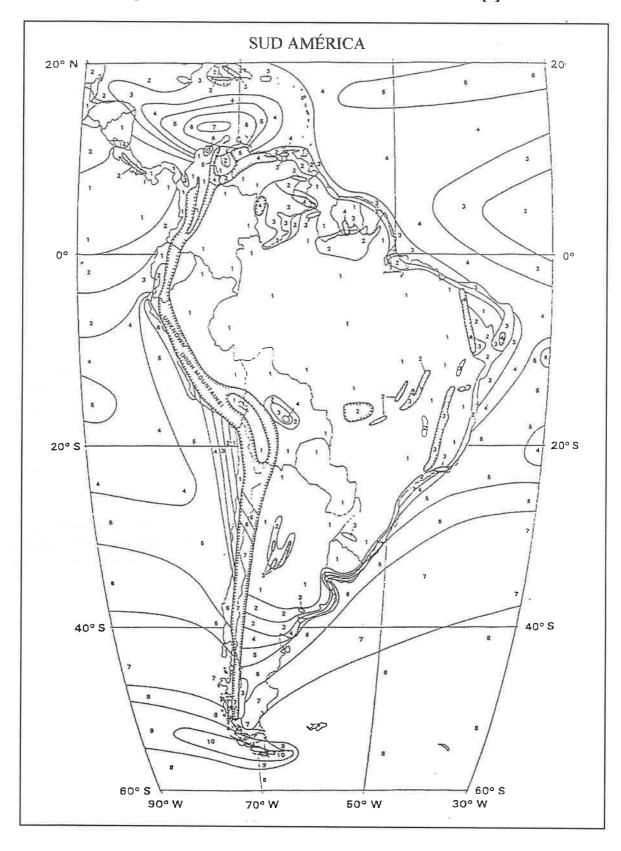


Figura 2.3: Velocidad del viento en América del Sur[2]

#### Ejercicio 2.1:

Toda la energía que consumimos proviene del sol, en forma de combustibles fósiles, energía eólica, biomasa, etc. Para muchos países, la biomasa es una fuente de combustible muy importante.

A través de la fotosíntesis, toda la vegetación del planeta convierte 10 billones de Watts de energía solar en biomasa. ¿Cuál es la proporción entre la energía eólica y la biomasa?

- a) La energía eólica es 1/100 de la biomasa
- b) La energía eólica y la biomasa tienen casi la misma proporción
- c) La energía eólica es 100 veces mayor que la biomasa.

#### Ejercicio 2.2:

¿Cuántos aerogeneradores de 500 kW (40 m de diámetro) se necesitan para abastecer el consumo de electricidad de Lima?. ¿Cuál será el costo total de los molinos?

Asuma que Lima cuenta con 8 millones de habitantes y que el consumo promedio es de 100 W por persona (incluyendo el consumo de fábricas, edificios públicos, etc.). El precio por molino es US\$ 1,250 por kW (inversión).

# 2.2 Datos de la velocidad del viento

Para determinar cuáles son las posibilidades de energía eólica, uno necesita tener datos de la velocidad del viento. Lo mejor es hacer las mediciones en el lugar donde se llevará a cabo el proyecto. A veces esto no es posible: alguien debe ir hasta allá a colocar equipos de medición (costosos) y por lo menos deben registrarse datos durante unos cuantos meses. Por lo tanto, en la mayoría de los casos, la primera opción es obtener datos de una estación meteorológica. El Estado generalmente posee algunas estaciones (vea la tabla 2.1). Los aeropuertos también suelen ser una alternativa.

En el caso ideal, los datos obtenidos de una estación meteorológica pueden ser utilizados para evaluar el régimen del viento en el lugar proyectado. Sin embargo, primero deben hacerse algunas revisiones. Los datos de una estación meteorológica deben ser complementados con datos del propio lugar.

Tabla 2.1: Ubicación de las estaciones de medición del viento de superficie en el Perú

No.	NOMBRE	DEPTO.	ALTITUD (m.s.n.m.)	VELOCIDAD MEDIA V (m/s)	ENERGÍA PRODUCIBL E (kWh/m2/año)
1	Iquitos	Loreto	104	1	31
2	Tumbes	Tumbes	25	2.6	252
3	Talara	Piura	50	8.5	4993
4	Piura	Piura	46	4	642
5	Yurimaguas	Loreto	184	1.1	34
6 .	Chiclayo	Lambayeque	27	5.1	1281
7	Cajamarca	Cajamarca	2620	1.9	1157
8	Chachapoyas	Amazonas	1834	2.4	271
9	Tarapoto	San Martín	356	0.9	31
10	Chimbote	Ancash	11	5.5	1157
11	Trujillo	La Libertad	33	5	1243
12	Huánuco	Huánuco	1859	3.6	554
13	Pucalipa	Pucalipa	145	1.6	156
14	Anta	Ancash	2748	3.8	638
15	Aeropuerto	Lima	13	3.4	507
16	Marcapomacocha	Junin	4413	3.5	499
17	Cerro de Pasco	Pasco	4333	1.7	94
18	Pto. Maldonado	Madre de Dios	256	1.8	188
19	Cusco	Cusco	3399	3.8	692
20	Huancayo	Junin	3350	2.6	457
21	Huancavelica	Huancavelica	6670	1.8	105
	Ayacucho	Avacucho	2761	1.5	59
23	Curahuasi	Apurimac	2678	4.4	1052
24	San J. de Marcona		31	6.4	2329
	Laguna Grande	lca	10	6.5	2465
26	Juliaca	Puno	3824	1.9	113
27	Arequipa	Arequipa	2518	3.6	452
28	Punta Atico	Areguipa	20	6.7	2701
29	Punta de Coles	Moquegua	50	5	1223
30	Desaguadero	Puno	3809	4.5	935
31	Tacna	Tacna	452	2.5	363

#### 2.3 Unidades

Para comenzar los datos de una estación meteorológica pueden estar expresados en cualquier unidad. ¡Tenga cuidado con esto!

#### Escala de Beaufort

En un inicio, las velocidades del viento se medían con la mano, especialmente desde la superficie del mar, porque las mediciones de la velocidad del viento eran importantes para los barcos. El aspecto de la superficie del mar era utilizado (qué tan grandes eran las olas, si había o no espuma) para establecer la velocidad del viento. Esta es la conocida Escala de Beaufort, que va de 0 (no hay viento) hasta 17 (ciclón). Posteriormente la escala fue adaptada para su uso en tierra (para mayor información, vea el anexo B).

Para darse una idea de lo que las cifra de la Escala de Beaufort significan en m/s, uno puede utilizar la siguiente fórmula de aproximación:

$$V_{SI} = 2.8 V_B - 3$$
 (2.1)

Donde:

V<sub>B</sub> velocidad del viento en unidades Beaufort (vea el Anexo B)

V<sub>SI</sub> velocidad del viento en m/s

Por lo tanto, la fuerza del viento 6 (el viento silba a través d los árboles y cables, los paraguas se sostienen con dificultad) es equivalente a una velocidad de viento aproximada de 14 m/s (el rango exacto es de 10.8 - 13.8 m/s).

NOTE que la fórmula anterior sólo proporciona un estimado. Para conversiones exactas de datos, vea el anexo B.

Aunque los observadores experimentados dicen ser capaces de calcular con exactitud la velocidad del viento utilizando la media unidad Beaufort, la escala es reemplazada cada vez más por las mediciones en m/s, que son más objetivas. (Por ejemplo, al parecer las observaciones en altamar expresadas en unidades Beaufort indican que la velocidad promedio del viento ha decrecido en media unidad a lo largo de los últimos 20 años. Esto no es posible. La explicación es que los barcos son más grandes, por lo que los observadores están por encima del nivel del mar y perciben las olas como más pequeñas).

# Otras unidades

La unidad más común para expresar la velocidad del viento es el metro por segundo [m/s]. Sin embargo, actualmente hay otras unidades en uso. La Tabla 2.2 contiene un listado de algunas de ellas:

Tabla 2.2: Unidades de velocidad del viento

DESIGNACIÓN	EXPLICACIÓN	CONVERSIÓN
km/h	Kilómetro por hora	1  km/h = 0.278  m/s
mph	Millas por hora	1  mph  = 0.447  m/s
Nudos	Nudos	1  nudo = 0.5  m/s

Es posible también que se hayan hecho mediciones del soplar del viento, es decir, que se haya medido la cantidad de kilómetros de viento que circuló.

# Ejemplo de la medición del correr del viento

Suponga que el correr del viento es medido cada 3 horas. Para uno de esos períodos de 3 horas, los datos registrados son los siguientes:

- A las 15:00 h, velocidad del viento: 157.3 km/h
- A las 18:00 h, velocidad del viento: 215.8 km/h

La cantidad de viento que pasó en este período fue de: 215.8 - 157.3 = 58.5 km. Una distancia de 58.5 km en 3 horas significa una velocidad del viento de 58.5/3 = 19.5 km/h, o (multiplique con 0.278): 5.42 m/s.

# Ejercicio 2.3:

Los siguientes datos acerca de la velocidad del viento han sido registrados en Arequipa, durante un periodo de 5 horas:

- A las 12.00 h, la velocidad del viento es 98.7 km
- A las 17.00 h, la velocidad del viento es 451.7 km

Calcule la velocidad promedio del viento en m/s durante el periodo registrado.

*Ejercicio 2.4:*Analice los siguientes datos:

Velocidad (m/s)	Tiempo (horas)
0-1	0
1-2	0
2-3	0
3-4	0
4-5	156
5-6	193
6-7	215
7-8	342
336	3439
2000	2000

¿Nota algo extraño? ¿Cuál podría ser la causa?

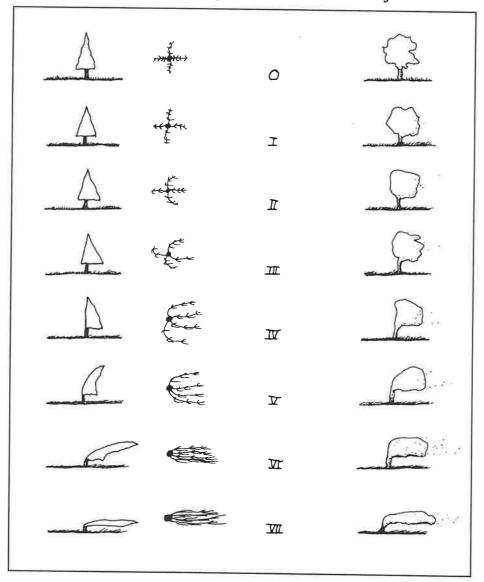
# 2.4 Instrumentos de medición

La medición del viento de acuerdo a los estándares de la OMM<sup>1</sup> para las estaciones meteorológicas es un asunto complicado, pues todos los detalles y requerimientos se remiten a la "Guía de Instrumentos Meteorológicos y Métodos de Observación de la OMM" [2].

# Velocidad del viento y dirección

Un primer método para conocer la velocidad y dirección aproximadas del viento en una determinada área consiste en observar el paisaje y las deformaciones de los árboles y arbustos. Si los árboles se ven marcadamente deformados por el viento, ello le dará una idea del viento y de su fuerza (vea la figura 2.4).

Figura 2.4 Gráfico de la Escala de Beaufort



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Organización Meteorológica Mundial (OMM)

Hay muchos instrumentos que miden la velocidad del viento y la dirección del mismo. El instrumento más común es el anemómetro de taza (vea la figura 2.5). La velocidad de la taza es del orden de la velocidad del viento. Mientras que el anemómetro está girando, se van generando pulsaciones eléctricas, las mismas que son contabilizadas. El aparato sólo mide la velocidad del viento horizontalmente, pero es independiente de su dirección. Es importante que el anemómetro tenga un momento de inercia (sea de construcción liviana), pues un anemómetro pesado tenderá a sobre estimar la velocidad del viento.

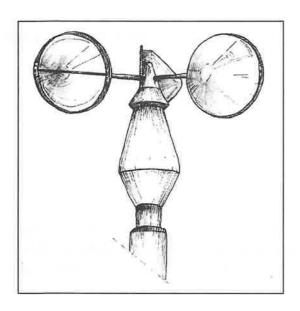


Figura 2.5: Anemómetro de taza

Debido a que no se mide la dirección del viento, es necesario contar con una veleta especial (vea la figura 2.6).

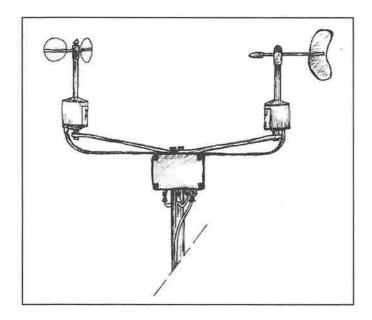


Figura 2.6: Veleta

Una alternativa es el anemómetro de propulsión, que debe combinarse con un sensor de dirección de viento. (Figura 2.7).

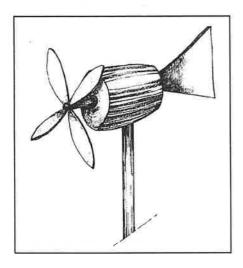


Figura 2.7: Anemómetro con hélice

# Temperatura y presión

La energía del viento es proporcional a la densidad del aire. Por lo tanto, es importante medir la presión del aire y también la temperatura. Generalmente, ambas son medidas en lugares protegidos del sol (pero no del viento), a más o menos 2 metros sobre el nivel del suelo (Figura 2.8).

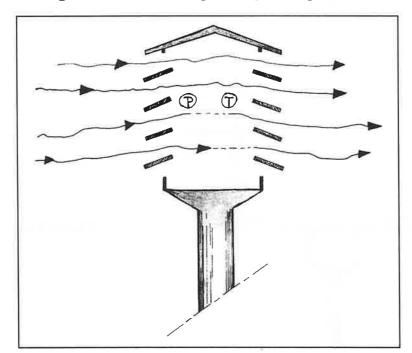


Figura 2.8: Medir la presión y la temperatura

La densidad del aire está dada por:

$$\rho = 1.225 \frac{288.15}{T} \frac{B}{1013.3} \tag{2.2}$$

Donde:

B = Presión barométrica [mbar] T = temperatura del aire [°K] ρ = densidad del aire [kg/m³]

La temperatura en grados Kelvin [°K] se obtiene sumando 273.15 a la temperatura en centígrados [°C]. Por lo tanto, 15 °C corresponde a 15 + 273.15 = 288.15 °K.

Es importante notar la influencia de la temperatura y la presión en la energía de salida (vea anexo B para las Tablas). Sobre todo a temperaturas más altas y a grandes altitudes, la energía de salida de los aerogeneradores es más baja que a temperaturas promedios al nivel del mar (vea las figuras 2.9 y 2.10).

Figura 2.9: Influencia de la altitud sobre la densidad del aire

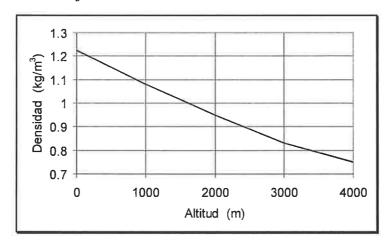
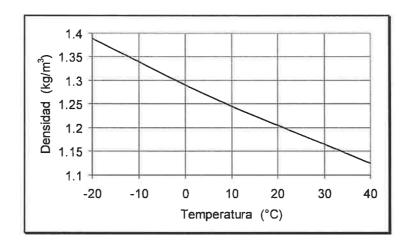


Figura 2.10: Influencia de la temperatura sobre la densidad del aire



### Ejemplo (ver Anexo C)

Asumamos que se propone aplicar energía eólica en una localidad a 200 m de altitud. Entonces la densidad del aire es en promedio  $\rho = 1,006 \text{ kg/m}^3$  en vez de 1,225 kg/m³ a nivel del mar. Esto significa 18% menos densidad = 18% menos de potencia.

#### Ejercicio 2.5:

Tal como se explicó en la sección anterior, tanto la temperatura como la altitud influyen en la densidad del aire y, por ende, en la producción de energía de un aerogenerador. Explique por qué.

#### Ejercicio 2.6:

Un pescador que vive en la costa del Perú desea instalar un pequeño molino de viento. Su sobrino, que vive en el sur de Chile, posee uno y está muy satisfecho con su rendimiento. Éste ha informado a su tío que la velocidad del viento en Chile es exactamente la misma que en el Perú; sin embargo, hace mucho más frío: la temperatura promedio es de 0° C (en vez de los 25°C registrados en el Perú). ¿Influirá ello en la salida del molino?

# **Exactitud**

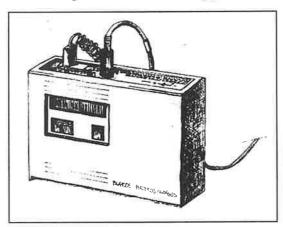
¿Cuál es el grado de exactitud que debe exigirse al realizar mediciones?. Esto depende por supuesto de lo que se hará con los datos y de la cantidad de dinero disponible para los equipos de medición.

Para la fiabilidad del estudio, un promedio de error en la velocidad del viento de +/- 0,5 m/s es aceptable. Si uno desea medir el funcionamiento de máquinas, un pequeño porcentaje de error en la potencia es probablemente una buena opción, resultando como admisibles errores de 1% en la velocidad del viento (porque la velocidad del viento aparece al cubo en la potencia), unos 3 grados en la temperatura (1%), y 0.01 bar en la presión (1%). Los aparatos deben calibrarse regularmente para asegurar que cubran los requerimientos.

## Data loggers

Antiguamente los datos se registraban a mano o con cuadros. Hoy en día la mayoría de las mediciones se hacen con equipos automáticos, llamados *data loggers*. (Figura 2.11)

Figura 2.11: Data logger



Si son calibrados, instalados y cuidados adecuadamente, los data loggers tienen la ventaja de que son confiables, exactos y nada sesgados. Los data loggers son básicamente pequeñas computadoras que leen los datos de entrada de un número de sensores a intervalos específicos y hacen señas de procesamiento sencillas (como promediar, mantener valores extremos).

Los data loggers pueden conectarse a computadoras, por ejemplo con líneas telefónicas. De esta manera la información puede transferirse a una PC para un futuro procesamiento.

Los data loggers aún son costosos (algunos miles de dólares) pero valen la pena, sobre todo cuando se realizan mediciones continuas en lugares remotos.

#### Almacenamiento

¿Qué cantidad de almacenamiento debe tener un data logger?. La información se almacena en bytes que, en cifras, puede concebirse entre 0 y 225. Si se sabe que la velocidad del viento está entre 0 y 25 m/s, las mediciones pueden hacerse con una resolución absoluta de 25/256 = 0.1 m/s. La resolución relativa es 1/256 = 0.004 = 0.4%.

Suponiendo que este 0.4% es aceptable, esto significa que uno sólo necesita 1 byte de almacenamiento para cada medición. Si hay 5 señales que deben registrarse cada 10 minutos durante 30 días, entonces podemos calcular la capacidad necesaria de almacenamiento. Un período de 30 días posee  $30 \times 24 \times 6 = 4,320$  intervalos de 10 minutos. Con 5 señales, esto significa  $4,320 \times 5 = 21,600$  mediciones. Como se requería 1 byte para cada medición, la capacidad de almacenamiento que se necesita es de 21,600 bytes = 21.6 kbytes.

## 2.5 ¿Cómo se mide la velocidad del viento?

¿Cómo se debe medir la velocidad del viento de manera que podamos usarla para predecir la potencia de salida de un aerogenerador?. ¿Cómo estar seguros de que los datos son suficientemente buenos?

La velocidad del viento en un lugar determinado depende de:

- el tiempo
- los obstáculos
- la altura
- tipo de terreno

# El tiempo

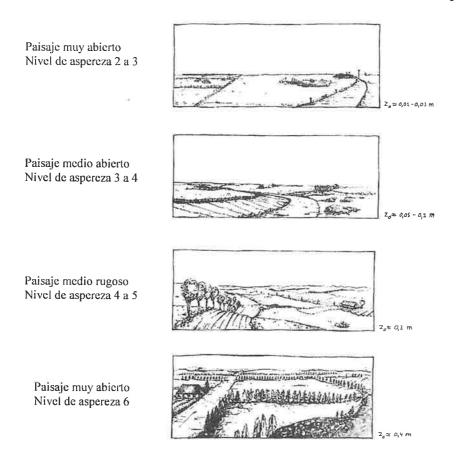
La velocidad del viento puede medirse durante una cantidad de tiempo indeterminada. Podemos medir cada segundo, o podemos medir el promedio en un año. Si uno desea evitar demasiados datos y tener una velocidad de viento adecuada para predecir la salida, podría utilizarse un intervalo entre 1 y 3 horas.

Esto no significa que recolectar datos durante períodos más largos con el fin de obtener un promedio hace a los datos menos útiles. En realidad, para regímenes de viento, puede ser suficiente tener sólo un promedio anual.

# Tipo de terreno

Al aproximarse a la superficie del terreno, el viento baja de velocidad (vea la figura 2.12 de la siguiente página) ¿Cuánto baja la velocidad? Eso depende de la rugosidad del terreno. Por ejemplo, los terrenos agrícolas con cultivos altos, tienen un mayor efecto de disminución de velocidad que los terrenos desérticos y planos, sin vegetación.

Figura 2.12: Clases de paisaje. La aspereza del terreno zo determina el freno del viento



La noción de rugosidad del terreno puede describirse cuantitativamente, asignando una altura de rugosidad  $z_0$  al terreno en la tabla 2.4.

 Tabla 2.4:
 Clasificación del terreno y rugosidad

CLASE	DESCRIPCIÓN DEL TERRENO	<b>z</b> <sub>o</sub> [m]
1	Agua, un alcance de 5 km. Mínimo	0.0002
2	Planos de lodo, nieve, sin vegetación, sin obstáculos	0.005
3	Abiertos y planos, hierba, algunos obstáculos aislados	0.03
4	Cultivos bajos, obstáculos grandes ocasionales, x/h > 20	0.10
5	Cultivos altos, obstáculos muy dispersos, 15 < x/h < 20	0.25
6	Área de parques, arbustos, muchos obstáculos, x/h = 10	0.5
7	Cobertura regular de grandes obstáculos (suburbios, bosques)	1.0
8	Centro de la ciudad con construcciones altas y bajas	?

h = altura del lo obstáculo

La rugosidad del terreno es una altura que se asocia con la presencia de más o menos obstáculos continuos. No es la altura del obstáculo. La rugosidad del terreno puede estimarse alrededor de:

$$z_0 = \frac{bH}{2} \tag{2.3}$$

Donde:

b parte del terreno cubierto por obstáculos representativos [-]

H altura del obstáculo representativo [m]

La rugosidad del terreno es determinada para sectores de 30-45 grados. Idealmente, debería derivarse de la ráfaga del viento, que tiene una relación directa con la rugosidad del terreno.

## **Ejemplo**

Supongamos que 10% del terreno en un sector de 30 grados está cubierto de árboles de 8 metros de altura, entonces la rugosidad del terreno estimada es de  $z_o = (0.1 \times 8)/2 = 0.4$  metros.

Vea la figura 2.13 para los perfiles de viento. A 60 metros de altura, la velocidad del viento puede considerarse como independiente del terreno local

Si se conoce la rugosidad del terreno y la velocidad del viento  $V_1$  a una altura  $h_1$ , la velocidad del viento  $V_2$  a una altura  $h_2$  puede hallarse utilizando la siguiente fórmula:

$$V_2 = V_1 - \frac{\ln (h_2 / z_0)}{\ln (h_1 / z_0)}$$
 Para:  $20z_0 < h < 60$  (m) (2.4)

Donde:

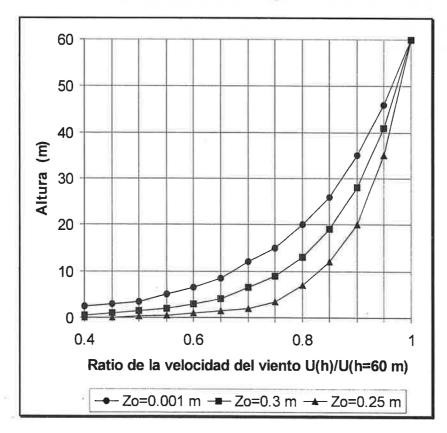
h altura sobre el nivel de suelo [m]

V<sub>1</sub> velocidad del viento a altura h<sub>1</sub> [m/s]

V<sub>2</sub> velocidad del viento a altura h<sub>2</sub> [m/s]

z<sub>o</sub> rugosidad del terreno [m]

Figura 2.13: Perfiles logarítmicos de la velocidad del viento. El perfil depende de la aspereza del terreno



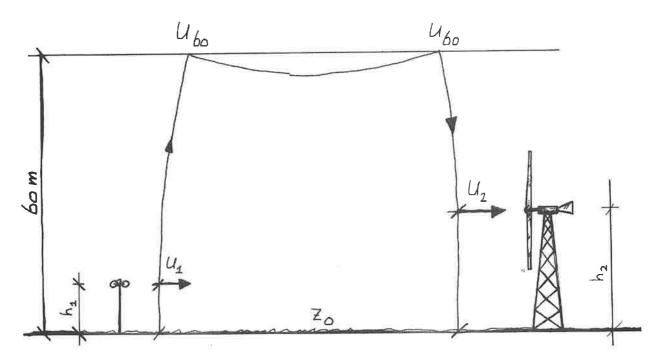
#### Ejercicio 2.7:

Usted puede calcular la velocidad del viento a cualquier altura empleando el gráfico 2.14 o la fórmula 2.4; tome como referencia la velocidad a 10 metros. Utilizando ambos métodos, calcule la velocidad del viento a 30 metros (la velocidad promedio a 10 metros es de 8 m/s). La aspereza z<sub>o</sub> del terreno es de 0.03 m ¿Obtiene la misma respuesta?

Vea la figura 2.14 para los perfiles de viento. A 60 metros de altura, la velocidad del viento puede considerarse como independiente del terreno local.

- Nota 1: Este perfil de viento es válido sólo si la frontera de la capa de la atmósfera no es inestable, es decir, que no hay transporte vertical de aire debido a diferencias en la temperatura. La inestabilidad se da si el suelo está caliente en comparación con el aire sobre él.
- **Nota 2:** Si el suelo está cubierto de obstáculos continuos (como tierras de cultivo) es mejor definir el nivel del suelo a 0.5 0.7 veces la altura del obstáculo (figura 2.14).

Figura 2.14: Cálculo de la velocidad del viento potencial



#### **Obstáculos**

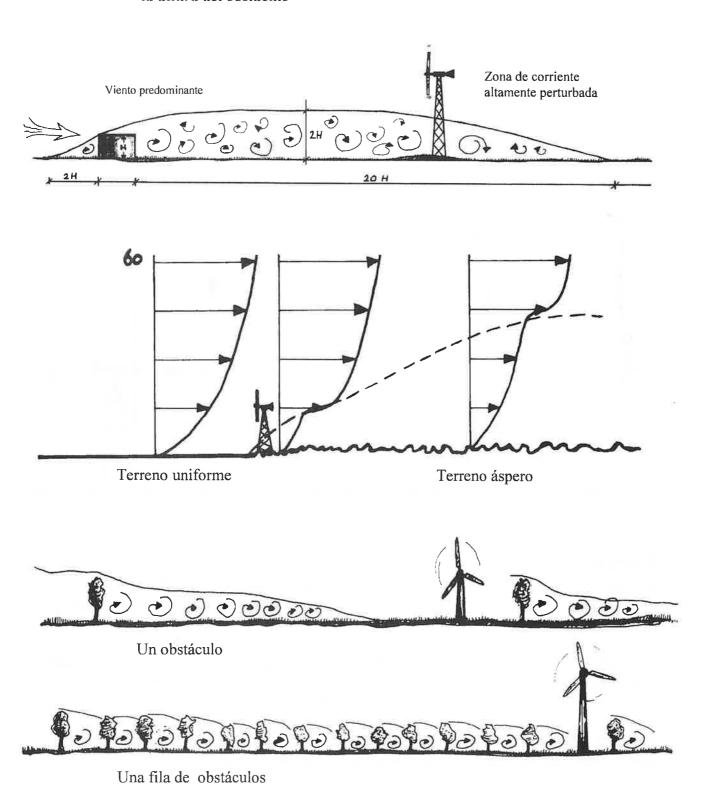
El viento debe medirse en un lugar libre de obstáculos. Los obstáculos producen un fenómeno en el cual el viento adopta cualquier dirección y velocidad, y no es posible corregir con exactitud la influencia del obstáculo.

Las mediciones son posibles si el anemómetro está a una altitud mayor que la del obstáculo, pero generalmente no queremos tener obstáculo alguno. Si hay obstáculos muy cerca, lo más adecuado será considerar inservibles las mediciones de la velocidad.

Si hay un edificio con una altura H, la velocidad del viento debe medirse a una altura de 4H y por lo menos 10H detrás del edificio, lo que significa que, para un edificio de 10 metros, la torre meteorológica debe estar a 40 m de altura, y por lo menos 100 m detrás del edificio. Si uno

desea medir a 2H = 20 m, el anemómetro debe estar por lo menos (digamos) a 40 - 50H = 400-500 m detrás del edificio. Con frecuencia la gente no se da cuenta de la influencia real de un obstáculo (vea la figura 2.15).

Figura 2.15: Influencia de obstáculos [1]. Note la gran zona de influencia (hasta 20 veces la altura del obstáculo



Se piensa que en los aeropuertos se pueden obtener buenos datos acerca de la velocidad del viento, puesto que generalmente están ubicados en terrenos planos. Sin embargo, olvidamos que también existen muchos edificios, que pueden obstruir al viento que viene de una dirección en particular.

No hay nada mejor que medir la velocidad del viento en la ubicación del aerogenerador a la altura del eje del rotor (de preferencia por lo menos durante un año).

# 2.6 Demanda en los datos registrados

Si es posible, se debe visitar la estación meteorológica de la que se utiliza información. Si esto no es posible, debemos contentarnos con una descripción. ¿Qué información se necesita?

### Altura del anemómetro

Es muy importante conocer a qué altura se realizan las mediciones de viento. Mediciones realizadas a 2 m de altura (para fines agrícolas) son inútiles para aplicaciones eólicas. Entonces: ¿cuál es la altura del anemómetro?

# Ubicación del anemómetro

Uno debería incluso conocer dónde se ubica el anemómetro. ¿Está en un lugar libre, sobre una torre o sobre un edificio? Si está sobre un edificio, ¿cuáles son las dimensiones de éste y qué tan alta es la torre sobre el edificio? Un anemómetro instalado a una distancia equivalente a una vez el ancho del techo, podría aún experimentar vórtices (turbulencias) desde el edificio, dando un error del 15% sobre la velocidad.

#### Exposición del anemómetro

El anemómetro debería estar bien expuesto al viento desde todas las direcciones. Un mapa de los alrededores (1:10,000) debe tenerse a la mano ofreciendo información acerca de la rugosidad del terreno y edificios a 1-2 km de la estación.

#### Cambios en el ambiente

Sucede con frecuencia que el área alrededor de la estación meteorológica se llena gradualmente de edificios, generando una aparente baja en la velocidad del viento. Básicamente cualquier cambio ambiental dentro de 2 km de la estación deberían tomarse en cuenta y registrarse. Esto puede referirse a nuevas construcciones, pero también así un granjero cercano ha decidido cultivar maíz en lugar de papas (¡diferencia en la altura de los cultivos!)

#### Descripción del instrumental

Para todos los detalles refiérase a WMO[2]. Lo más importante es:

• ¿Cuál es el intervalo de calibración del equipo?

- ¿Cuándo fue la última vez que el equipo fue calibrado?
- ¿Están los anemómetros y sensores de dirección de viento libres de polvo?
- ¿Cuál es el método de registro? (Sabía que si se leen tablas, los observadores tienden a registrar más los números pares que los impares?)
- ¿Cuál es el umbral inicial del anemómetro?

#### **Datos**

(Nuevamente) ¿Para qué altura son los datos?

¿En qué unidad se registran?

¿Son los datos corregidos de la norma del WMO (velocidad potencial del viento) o no?.

¿Cuál es el intervalo de registro?. ¿Hay datos de ráfagas?

#### Ejercicio 2.8:

Un edificio de 20 m de altura y 60 m de ancho está ubicado frente a un aerogenerador, a 300 m de distancia. La turbina eólica tiene una torre de 50 m y un diámetro de rotor de 40 m. El viento pasa primero por el edificio y, luego, llega al aerogenerador; el resto del terreno es bastante plano. ¿El edificio afectará la energía eólica que llega al aerogenerador?

- a) No, porque la parte inferior del rotor mide 50 20 = 30 m de altura, siendo éste más alto que el edificio. La energía eólica no se ve afectada;
- b) Sí, el edificio anulará cerca del 10% de la energía;
- c) Sí. Sin embargo, la distancia entre el edificio y la turbina es bastante grande, de modo que la pérdida de energía será sólo del 1%.

#### Ejercicio 2.9:

Además de la velocidad, la dirección del viento es también un factor importante. Si usted coloca un aerogenerador en un jardín, tendrá que evitar que los obstáculos (árboles, casas) disminuyan la velocidad del viento antes de que éste alcance el generador. ¿Sabe usted cuál es la dirección predominante del viento en el área de la escuela?

#### Ejercicio 2.10:

Para determinar dónde instalar un aerogenerador, usted deberá tomar en cuenta la velocidad promedio y la dirección del viento, los obstáculos en los alrededores, etc.; sin embargo, otro aspecto que debe considerar es el ruido que produce, por lo cual no debe ser instalado muy cerca de las casas.

En Malabrigo, encontramos una turbina eólica ubicada a 500 m de un pueblo; ésta produce un ligero sonido silbante difícil de percibir debido al bullicio del pueblo y al sonido del mar cercano. Los pobladores no se ven afectados por el ruido del aerogenerador.

Ahora, la compañía de electricidad desea instalar más turbinas eólicas en esa localidad, pero ha acordado con los pobladores que el nivel de ruido no será más del doble del nivel actual. ¿Cuántos aerogeneradores podrán instalarse en total (incluyendo el actual)?

- a) Dos, porque dos turbinas producen el doble de ruido que una;
- b) Cuatro, porque el sonido se dispersa a través de la superficie de una esfera;
- c) Ocho, porque el sonido se dispersa sobre el volumen de una esfera;
- d) 10 turbinas

#### 2.7 Distribución de la velocidad del viento

El viento no es constante, su velocidad varía constantemente, entonces hay que tomar en consideración las fluctuaciones y períodos sin viento cuando se diseñe y se instale un sistema eólico.

## Períodos sin viento

Los más importantes son los períodos donde no hay viento. Si hay dos meses sin viento en los que (digamos) la mayor cantidad de agua debe bombearse, entonces la utilización de energía eólica no será aplicable, a pesar de un promedio alto de viento (vea la figura 2.16).

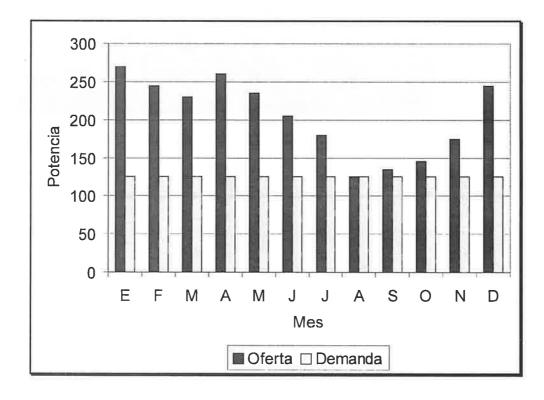


Figura 2.16: El mes crítico (agosto)

# Patrón anual

Al considerar la energía eólica uno debe identificar el mes crítico o crucial, es decir, el mes con la mayor demanda de energía y la velocidad de viento más baja.

## **Adormecimiento**

Aún más uno debe considerar la posibilidad de días sin viento. ¿Cuántos ocurren consecutivamente?. ¿Es posible dejar de contar con viento por dicho período?. La cantidad de días sin viento puede determinar el almacenamiento que debe hacerse o si se requiere de un sistema de apoyo.

## Patrón diario

Es posible que el viento tenga patrones diarios distintos: por ejemplo sólo hay viento durante el día pero no durante la noche. Debe investigarse si el patrón de viento coincide con el patrón de demanda o no (vea la figura 2.17).

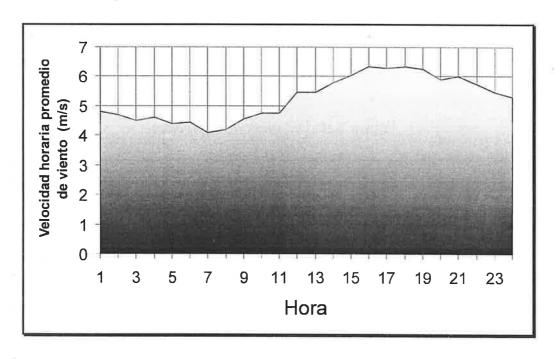


Figura 2.17: La velocidad del viento durante el día

#### Ejercicio 2.11:

¿En qué escala de tiempo se expresan las fluctuaciones de salida de la energía eólica (segundos, minutos, horas, días, semanas, meses, años)?

#### Ejercicio 2.12:

Antes de trabajar con molinos de viento (u otro tipo de energía renovable), es aconsejable determinar si existe correlación, es decir, si el suministro y la demanda de energía coinciden. Por ejemplo, en el caso de las bombas eólicas, deberá determinar si correrá viento durante la temporada seca, que es cuando más agua necesitará.

Se pretende instalar aerogeneradores para abastecer de energía a Malabrigo, pueblo de la costa peruana. ¿Será importante tomar en cuenta la correlación?.

La velocidad del viento es de:

Meses	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Año
Velocidad (m/s)	9.7	8.2	10.2	10.8	12.6	7.5	6.9	7.8	8.6	8.3	8.9	8.9	9.0

# 2.8 Diagrama de flujo

Este capítulo hace un listado de los pasos a seguir si la conveniencia de una ubicación para un aerogenerador debe ser juzgada. Este diagrama de flujo es sólo para el viento. Un lugar puede no ser conveniente por otras razones: tal vez el lugar es inasequible, las facilidades para realizar los trabajos de mantenimiento muy escasas o la extensión de la red resulta una mejor solución.

Calcule la velocidad del viento a partir de un mapa a gran escala.



Obtenga datos de una estación meteorológica cercana al lugar.

- Averigüe a qué altura fueron registrados los datos y en qué unidad.
- De ser posible visite la estación para una revisión. Especialmente revise la ubicación del anemómetro y los obstáculos.



Visite el lugar escogido y busque indicadores de la velocidad del viento en el terreno).



Trate de calcular la velocidad del viento en el lugar a partir de los datos de la estación. Para terrenos accidentados esto puede resultar difícil o imposible, pero trate de estar lo más cerca posible. Combine su cálculo con la información obtenida anteriormente.



Dependiendo del proyecto (estudio de factibilidad, instalación de algunos aerogeneradores pequeños, construcción de un parque eólico, etc.) decida si son necesarias las mediciones en el lugar. Si lo son, llévelas a cabo.



Decida si el lugar elegido es conveniente en lo que se refiere al régimen de viento (haga un cálculo del producto de salida del aerogenerador).

# 3 COMPONENTES DE LA ENERGÍA EÓLICA

#### 3.1 Rotor

La función del rotor es la de extraer energía del viento de la manera más eficiente, mientras mantiene las fuerzas del rotor mismo y las de todo el aerogenerador en mínimo.

Los rotores más comunes son:

- a) Savonius de eje vertical (Figura 3.1).
- b) Tipo hélice de eje horizontal (Figura 3.2).
- c) Darrieus de eje vertical, convencional y alternativo (Figura 3.3 y 3.4).



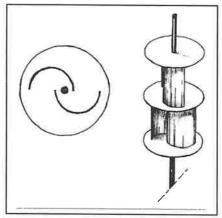


Figura 3.2: Rotor de eje horizontal a barlovento [5]

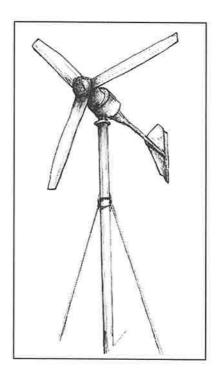


Figura 3.3: Rotor Darrieus convencional [5]. Note el cabo de tensión y la ausencia de la torre

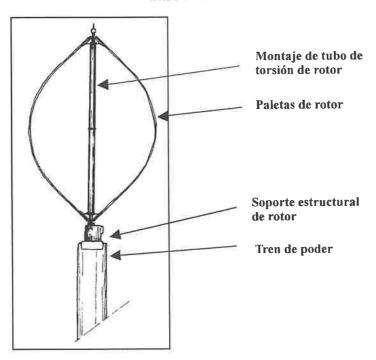
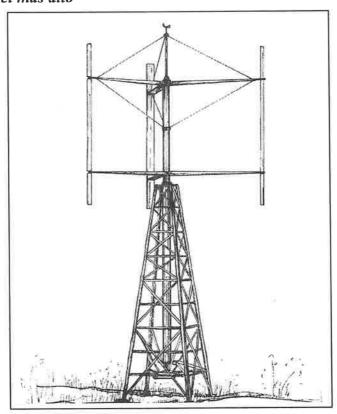


Figura 3.4: Rotor Darrieus alternativo [5]. Note torre de maderaje para que el rotor esté a un nivel más alto

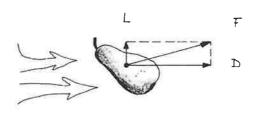


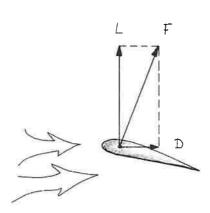
De estos tres tipos el de tipo hélice es el más utilizado. Vamos a ver por qué es esto así.

## Sustentación y resistencia (arrastre)

Si un objeto es puesto en un flujo de aire (viento), experimentará dos fuerzas: la de sustentación y la de arrastre (resistencia). Por definición, el arrastre es la fuerza en la dirección del flujo de aire y la sustentación es la fuerza perpendicular al flujo del viento (ver fig. 3.5).

Figura 3.5: Fuerza de sustentación (lift) y fuerza de arrastre (drag). Cuando se emplea un aspa con buen perfil, la fuerza de sustentación es mucho más grande que la fuerza de arrastre





Si está manejando un auto y saca la mano por la ventana, el viento la empujará hacia la parte trasera del auto: éste es el arrastre. Las máquinas de arrastre son las más fáciles de entender, y es por eso que los inventores construyen los de este tipo. El rotor de tipo Savonius es una máquina de tipo arrastre.

La sustentación es la fuerza que impide a los aviones caerse en el cielo: porque vuelan a grandes velocidades, se crea una fuerza hacia arriba en las alas lo que contrarresta la gravedad. Es también la fuerza que hace posible navegar en un barco, incluso contra el viento. El rotor Darrieus y el de tipo hélice son máquinas de tipo sustentación.

Se puede mostrar que usar sustentación permite un mejor funcionamiento que utilizando el arrastre (ver tabla 3.1). Esto no es sólo una cosa práctica sino fundamental. Sin embargo mostrar eso está fuera de los objetivos de este curso.

Tabla 3.1: Eficiencia de máquinas de sustentación y arrastre

TIPO DE PROPULSIÓN	SUSTENTACIÓN	ARRASTRE	
Eficiencia máxima (teórica)	16/27 = 59%	30%	
Máxima eficiencia (práctica)	50%	15%	

A esto debe agregársele que las máquinas de arrastre son menos económicas en el uso de material.

#### Ejercicio 3.1:

Explique en sus propias palabras el concepto de "fuerza ascensional" o de sustentación, que permite a los aviones alzar vuelo y que, además, es la fuerza motriz de los molinos de viento.

## Dos guías importantes

- 1. Siempre use máquinas de sustentación (tipo hélice);
- 2. Siempre desconfie de inventores de máquinas de arrastre.

## Eje horizontal vs eje vertical

No hay una ventaja fundamental en usar máquinas sea de eje horizontal o de eje vertical. Es sólo una cuestión de conveniencia en la construcción que ha hecho a la turbina de eje horizontal más popular, y ahora tiene la ventaja definitiva de 'haberse mantenido en el medio por tanto tiempo y en grandes cantidades', es decir, hay más experiencia con él y en consecuencia mayor confiabilidad.

#### 3.1.1 Características del rotor

La característica más importante del rotor es la curva de potencia/velocidad del viento o curva P-V. Esta curva nos da la potencia extraída del viento como una función de la velocidad del rotor (vea la figura 4.4). Las curvas están dadas por la fórmula:

$$P = C_P \frac{\rho}{2} A V^3 \tag{3.1}$$

Donde:

A área barrida por el rotor =  $\rho R^2$  [m<sup>2</sup>]

C<sub>p</sub> coeficiente de funcionamiento (o de potencia) [-]

P potencia del eje del rotor [W]

V velocidad del viento [m/s]

ρ densidad del aire [kg/m³]

La cantidad de potencia que es extraída del viento depende de qué tan rápida gira el rotor. Si el rotor está quieto nada está haciendo y la potencia es cero. Si el rotor está girando muy rápido la potencia es también cero. Entre estos dos valores está la velocidad óptima que da una potencia

máxima a cierta velocidad de viento.

Teóricamente el coeficiente  $C_p$  nunca puede ser mayor que 16/27 = 0.59. En la práctica valores máximos razonables son (ver tabla 3.2):

Tabla 3.2: Coeficiente de funcionamiento

TIPO DE TURBINA	NORMAL	MÁXIMO	
Bombas de agua	0.25	0.35	
Cargadores de viento	0.35	0.40	
Aerogeneradores grandes	0.45	0.50	

La tabla 3.2 puede ofrecer la información del fabricante: si su C<sub>p</sub> es mayor que los valores detallados en la columna de la derecha, sus figuras son demasiado optimistas (ver capítulo "Diseño del sistema") en cómo hacer esto.

En la práctica casi todas las eficiencias de los sistemas serán mucho más bajas aún, debido a las pérdidas en el generador y porque a velocidades altas de viento uno no desea toda la potencia que se pueda obtener.

#### 3.1.2 Producción

Para aerogeneradores grandes (D > 20 m), las palas son hechas de fibra de vidrio reforzada con poliester (como el casco de un barco) o con 'wood-epoxy' (muchas capas finas de enchape pegadas juntas). Dado que la producción es de todos modos un proceso costoso, se hacen muchos esfuerzos en obtener formas torneadas óptimas, y perfiles de pala sofisticados.

Para aerogeneradores pequeños, existen otras posibilidades como el plástico, metal y madera. Para facilitar la manufactura las palas generalmente no tienen torsión.

A pesar del hecho de que el aluminio es ligero, no es bueno utilizarlos para las palas, porque el aluminio siempre fallará bajo eventuales condiciones variables de carga.

## 3.1.3 Dos preguntas comunes

Aquí hay dos preguntas que frecuentemente se hacen.

#### ¿Por qué algunos rotores tienen sólo dos o tres palas, mientras que otros tienen muchas?

Si una pala recibe una cierta cantidad de energía del viento, dos palas reciben el doble de esa energía, tres palas el triple y así sucesivamente. Este razonamiento nos llevaría a la conclusión de que rotores con muchas palas deben usarse todo el tiempo.

Lamentablemente, no hay una respuesta sencilla a esta pregunta. Un parámetro muy importante

en la explicación es <u>la velocidad específica de la punta</u> ( $\lambda$ ), que es la velocidad de la punta de la pala dividida por la velocidad del viento. Cuando un rotor tiene una gran velocidad específica, eso significa que gira rápido.

Utilizando la aerodinámica puede mostrarse que para altas velocidades específicas de la punta y buenos perfiles de pala (con alta relación de sustentación/arrastre), no tiene sentido usar muchas palas, pues pocas de éstas son suficientemente buenas. Para bajas velocidades específicas y malos perfiles (como planchas sencillamente dobladas) muchas palas dan más energía.

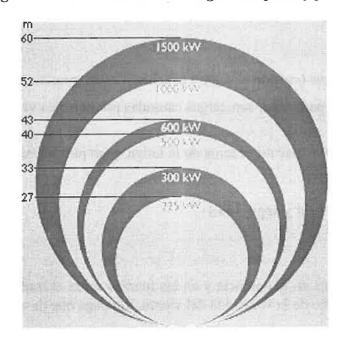
Una explicación intuitiva es la siguiente: si el rotor está girando lentamente sólo con algunas palas, mucho viento puede pasar a través del rotor sin 'ser visto' por las palas, Por lo tanto se requieren muchas palas. Si el rotor está girando rápidamente, pocas palas son suficientes para 'atrapar' todo el aire.

Un efecto adicional es que cada pala perturba el flujo de aire de la siguiente pala. Este no es un problema para las aerobombas lentas (que tiene baja eficiencia de todas maneras) pero este efecto si cuenta para los aerogeneradores grandes.

Tabla 3.3: Velocidad específica y número de palas

Velocidad específica (m/s)	1	2	3	4	5-8	8-15
Número de palas	6-20	4-12	3-6	2-4	2-3	1-2

Figura 3.6: Relación entre longitud de palas y potencia



#### ¿Por qué tienen torsión las palas?

Para hacer uso óptimo de las fuerzas de sustentación creadas por el viento, el ángulo entre la cuerda de la pala y la velocidad del viento vista por la pala (el ángulo de ataque) debe tener cierto valor, generalmente unos pocos grados. El viento incidente en la pala es la suma vectorial de la velocidad del viento real y la velocidad de la pala misma. La velocidad de la pala en la ubicación r desde el centro del rotor es:

$$V_{B}(r) = \Omega \times r \tag{3.2}$$

Donde:

V<sub>B</sub> = velocidad de la pala en ubicación **r** [m/s]

r = radio [m]

 $\Omega$  = velocidad del rotor [rad/s]

Para obtener el ángulo de ataque óptimo en todos los radios, si la velocidad de la pala cambia con el radio, se requiere la torsión.

Sin embargo, mucho de la energía viene de la parte exterior de la pala, por lo que una pala sin torsión que es (casi) correcta en la parte exterior, pero no en la interior, puede todavía trabajar bien (y es más fácil de producir energía).

## Ejercicio 3.2:

¿Por qué los antiguos molinos de viento (bombas de agua, molinos para granos) tienen más paletas que los actuales?

#### 3.1.4 Fuerzas en el rotor

Las fuerzas en el rotor son:

- 1) Cargas de fatiga (estas cargas no son tan grandes, pero cambian en magnitud todo el tiempo) como:
  - cargas de viento
  - gravedad
  - cargas giroscópicas (cuando el rotor y el cabezal están girando al mismo tiempo)
- 2) Cargas extremas: en particular, son cargas causadas por posibles velocidades máximas de viento.

En este curso no es posible discutir el tema de la fatiga, pero pueden hacerse cálculos a mano de la carga extrema.

# 3.2 Sistemas de control y seguridad

#### 3.2.1 Generalidades

Su función es fijar límites en la potencia y en las fuerzas sobre el molino. La potencia en el viento se eleva con el cubo de la velocidad del viento. Suponga que deseamos operar el rotor a

su máximo  $C_P = 0.4$  en todos los casos, entonces la potencia (para un rotor con una unidad de área barrida) sería de:

A 4 m/s: P = 16 W
 A 8 m/s: P = 125 W
 A 12m/s: P = 423 W

Esto significa que toda la turbina debe ser diseñada para tomar una máxima potencia de 423 W, mientras que gran parte del tiempo la potencia es menor a ésta. Está claro que sería poco económico y la potencia a velocidades máximas limitada de alguna manera por el sistema de seguridad.

#### Dirección del viento

De otro lado, si queremos obtener la potencia máxima del viento a velocidades de viento menores: el rotor debe mantenerse perpendicular al viento de una manera u otra, por ejemplo con una cola. Frecuentemente este mecanismo es combinado con el mecanismo de seguridad.

# 3.2.2 Tipos de sistemas de control y seguridad

## Ningún sistema de seguridad

Contradiciendo lo que dijéramos anteriormente, hay algunos aerogeneradores que no tienen sistemas de control/seguridad de potencia. En particular para aerogeneradores pequeños (donde el costo de materiales es relativamente bajo) puede resultar ser una opción simplemente hacer la turbina tan pesada que pueda soportar cualquier carga de viento.

En estos casos se usaría un rotor con cola frente a la torre o un rotor detrás de la torre. La ventaja del rotor detrás de la torre es por supuesto que no se requiere de cola (Figuras 3.7 y 3.8)

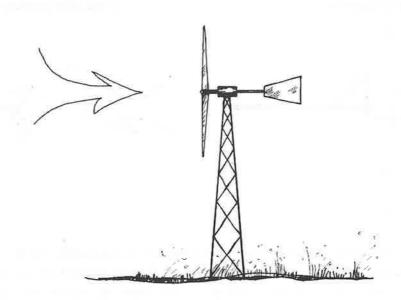


Figura 3.7: Rotor a barlovento con cola (izquierda)

Figura 3.8: Rotor a sotavento (derecha). No se necesita una cola

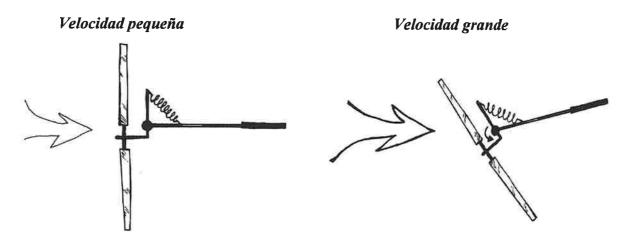


# Sistema de rotor excéntrico

Tan pronto el aerogenerador se hace más grande, algo debe hacerse para limitar la potencia. Una estrategia común es darle al rotor una excentricidad pequeña. La cola se conecta al cabezal con una bisagra.

El viento hará girar el rotor fuera de su dirección si las velocidades se elevan; al mismo tiempo la cola mantendrá la dirección del viento. Si se coloca un resorte entre el cabezal y la cola se crea un equilibrio de momentos (vea la figura 3.9).

Figura 3.9: Rotor excéntrico con cola y resorte (vista superior)

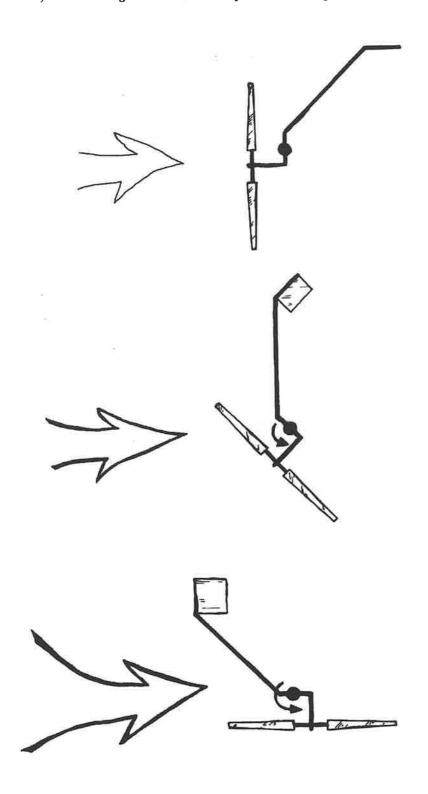


Un sistema muy inteligente es el rotor excéntrico con una veleta lateral con bisagra (vea la figura 3.9) donde la veleta puede girar sobre un eje horizontal. A velocidades bajas de viento la gravedad mantendrá la veleta en posición vertical y el rotor se mantendrá perpendicular al

viento. A velocidades de viento mayores el rotor girará y el viento levantará la veleta. Bajo condiciones de tormenta la veleta estará horizontal y el rotor paralelo al viento.

Figura 3.10: Sistema con cola rotativa (Vista superior).

- a) Velocidad pequeña: el rotor está perpendicular con respecto al viento, la cola está vertical.
- b) Velocidad moderada: el rotor está girando, la cola está levantada.
- c) Velocidad grande: el rotor está paralelo con respecto al viento, la cola está horizontal



El paso del aire a través del rotor causa un movimiento rotatorio, creándose una estela. En todos los sistemas mencionados anteriormente, es siempre buena política mantener las veletas fuera de esta estela, ya que pueden ocurrir problemas de resonancia debido a la interacción del movimiento de la veleta y el complicado flujo de aire.

# Sistema de control del paso del álabe

En lugar de mover el rotor también es posible girar los álabes. A velocidades de viento altas el álabe cambia de ángulo para 'dejar pasar' el aire.

Básicamente esta idea no tiene nada de malo, pero en aerogeneradores pequeños mecanismos de inclinación son generalmente muy costosos y poco confiables. No es tan difícil ver por qué: debido a que las palas deben girar, se requiere de algún tipo de sujetador. Los sujetadores no funcionan bien cuando no están girando porque no se puede garantizar una buena lubricación. Por tanto tienden a atascarse, especialmente dado que es bastante difícil realmente sellar los sujetadores del ambiente.

La última observación también es válida para la construcción del contrapeso y el resorte; invariablemente quedan atascados con el polvo y suciedad. Es mejor evitarlos.

#### Ejercicio 3.3:

¿Cuál cree usted que es el mecanismo de seguridad de un aerogenerador grande?. Por lo general, no posee cola.

#### 3.2.3 Problemas comunes

El sistema de control y seguridad es un sistema de partes movibles, por tanto todo tipo de problemas que ocurren en cualquier sistema pueden ocurrir en este:

- El soporte puede atascarse por falta de lubricación o por causa de la suciedad
- Algunas partes se pueden romper como los resortes y cables
- Todo el sistema puede entrar en resonancia a ciertas velocidades de viento.

Muchas oscilaciones combinadas pueden darse, por ejemplo a través de la interacción al girar el rotor y el movimiento de arriba hacia abajo.

#### 3.3 Generador

#### 3.3.1 Generalidades

La función del generador es convertir la energía giratoria del rotor en energía eléctrica. Los generadores de mayor uso en aerogeneradores son:

- Generador de imán permanente
- Generador asíncrono
- Generador de velocidad variable.

Los cargadores eólicos generalmente funcionan con generadores de imán permanentes; estos generadores pueden funcionar a bajas velocidades de rotación, que hace posible colocar el rotor de la turbina directamente en el eje del generador sin usar una caja de engranajes.

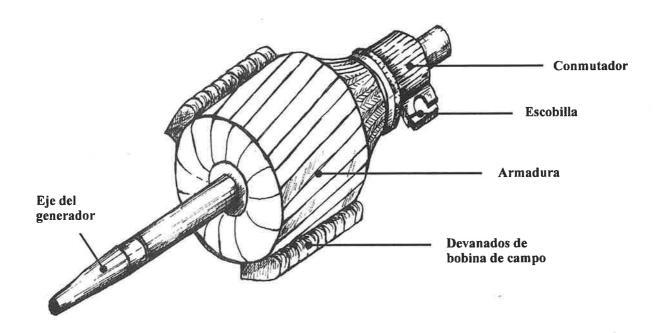
Los aerogeneradores grandes conectados a red, utilizan generadores que no tienen imanes permanentes sino electroimanes (bobinas) en el centro. Estos generadores pueden girar a una velocidad que es diferente por muy poco de la frecuencia de 1,500 r.p.m. de la red, por ejemplo 1,510 o 1,520 r.p.m.. En este caso se habla de generadores asíncronos. Si la diferencia con la frecuencia de la red es muy grande, uno habla de generadores de velocidad variable.

# 3.3.2 Generadores de imanes permanentes

#### Generalidades

Vea la figura 3.11 para una visión general. El centro del generador (también llamado 'rotor') tiene varios juegos de imanes empotrados en fierro dulce que pueden ser magnetizados muy fácilmente.

Figura 3.11: Generador de imanes permanentes [2]



El eje está hecho de acero inoxidable no magnetizado. Por tanto se crea un campo magnético como se bosqueja en la figura 3.12.

Bobina con núcleo de hierro

Figura 3.12: Líneas magnéticas en un generador

La cantidad de imanes se elige de tal manera, que la máxima fuerza de campo magnético se alcance en las bobinas (llamado 'estator'). Los imanes son colocados de manera oblicua para evitar que el rotor se pegue.

Si el núcleo rota, se crea un campo magnético cambiante en las bobinas, y una corriente alterna se produce. Empernando las bobinas de diferentes maneras pueden hacerse corrientes de 2 ó 3 fases.

Naturalmente la frecuencia de la corriente depende de la velocidad del rotor y no es constante. Por lo tanto la corriente es enviada a través de un rectificador.

#### Producción

Los generadores de imán permanente pueden comprarse como parte de una turbina.

Otra posibilidad es comprar un generador asíncrono. Estos generadores son usualmente hechos para funcionar a 1,500 r.p.m.. Es posible eliminar el rotor estándar y reemplazarla por un centro de imanes permanentes, haciendo al generador más conveniente para funcionar a 50-500 r.p.m.. En realidad en este procedimiento sólo el eje y el centro necesitan reemplazarse, los soportes estándar pueden usarse nuevamente. Sin embargo, toda la operación no es sencilla, y se requiere de herramientas sofisticadas.

#### 3.3.3 Generadores asíncronos

#### Generalidades

Generadores asíncronos estándar funcionan a velocidades cercanas a la frecuencia de la red o

múltiplo de ella. Para aerogeneradores grandes se usa frecuentemente 1,500 r.p.m. = 25 Hz (en los EE.UU. 1,800 r.p.m.). Estos generadores se caracterizan por el deslizamiento, que es la diferencia entre la velocidad del generador a potencia nominal y la frecuencia derivada de la red.

Un generador puede funcionar por ejemplo a 1,515 r.p.m. Entonces el deslizamiento es 1,515 – 1,500 = 15 r.p.m. Esto corresponde a 15/1,500 = 0.01 = 1% de deslizamiento. Por tanto los generadores asíncronos funcionan casi de manera sincrónica, lo que hace necesario que el rotor funcione a una velocidad específica (fija): el rotor no puede funcionar siempre a una eficiencia óptima.

#### Velocidad variable

Generadores de velocidad variable pueden funcionar eficientemente en un rango bastante amplio de velocidades (por ejemplo 1,200 - 1,800 r.p.m.) Esto se logra con unos circuitos electrónicos avanzados. Este tipo de generadores pueden combinarse con rectificadores y un inversor para obtener un voltaje y corriente sinusoidal de buen comportamiento.

#### 3.4 Baterías

#### 3.4.1 Generalidades

La función de las baterías es de almacenar la energía eléctrica por períodos cuando no hay viento.

Es poco satisfactorio que no haya una buena manera de almacenar electricidad que es extraída del viento, a excepción de algunos casos (como el bombeo de agua). Con la electricidad la única manera es usando una batería. Lamentablemente, éste es un componente con propiedades que dejan mucho que desear.

#### Una batería tiene corta vida:

Mientras que un molino o panel solar pueden usarse por 10-20 años, la vida de una batería es generalmente 1,000-2,000 ciclos de carga/descarga. Si no hay ciclos de carga/descarga cada día la batería dura aproximadamente 3-5 años.

#### Una batería es pesada:

Mucho peso (plomo) se requiere para almacenar poca electricidad. Generalmente se requieren 4-6 kilos para almacenar 1 kW-h. Y sólo la mitad de la capacidad 'oficial' puede usarse si no se quiere estropear la batería muy rápidamente.

#### Una batería tiene baja eficiencia:

Sólo alrededor del 80% de lo que entre a la batería puede recuperarse. Ambas, la eficiencia de entrada y salida, son de alrededor del 90%.

## Existen muchas sustancias tóxicas y peligrosas en la batería:

Como el plomo, ácido sulfúrico, o alternativamente el cadmio. Si hay un corto circuito la batería se recalienta y puede escaparse ácido sulfúrico.

## Una batería requiere de mantenimiento:

Regularmente casi todas las baterías deben recargarse con agua destilada.

## La cantidad de energía en una batería es difícil de determinar:

La única manera de averiguar cuánta energía hay en una batería, es determinando la densidad del ácido que es un procedimiento bastante inexacto.

A pesar de todas estas desventajas las baterías son la única manera práctica de almacenar y transportar electricidad (si no hay red), por lo tanto estamos sujetas a ellas.

## 3.4.2 Principios de operación

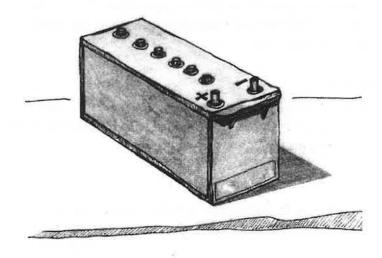
Cualquier batería está hecha de un número de células conectadas en serie por lo que sus voltajes suman un valor estándar, como 12 ó 24 V.

Una célula consta de dos electrodos (barras o planchas) con alguna sustancia química sobre ellos. Entre los electrodos hay separadores. Durante la descarga hay una reacción química que genera electricidad, durante la carga esta reacción es invertida.

#### 3.4.3 Características

Las baterías son una ciencia en sí mismas, y algunas personas han dedicado sus vidas al estudio de baterías. Algunas expresiones utilizadas con relación a las baterías son explicadas a continuación para que pueda discutir con un vendedor de baterías o comentar al respecto en sus reuniones.

Figura 3.13: Batería [4]



La primera cosa que se debe saber acerca de las baterías es su capacidad. La capacidad de una batería es la cantidad de energía que se le puede dar o recibir de ella. La unidad de carga es el amperio hora (Ah). Una batería con 80 Ah de capacidad puede (teóricamente) producir 8 A durante 10 horas o 20 A durante 4 horas y así sucesivamente. Si es una batería es de 12 V, esto significa que la cantidad de energía es  $12 \times 10 \times 8 = 960 \text{ Wh} = 0.96 \text{ kWh}$ .

El estado de carga es la cantidad de energía aún disponible en la batería. Si el estado de carga es de 30% en la batería arriba mencionada, entonces  $0.3 \times 0.96$  kWh = 0.29 kWh están aún disponibles antes de que la batería se vacíe. En la práctica la máxima capacidad nunca puede utilizarse. Para la mayoría de las baterías es fatal vaciarlas completamente. En realidad las baterías de los carros no deben descargarse por más del 20 – 30 % (para que siempre haya un 70-80 % sobrante), y aún para baterías mejores las llamadas descargas profundas acortan su tiempo de vida.

La capacidad depende también del grado de descarga. A un grado bajo de descarga, puede usarse más energía de la batería que bajo un grado de descarga alto. El grado de descarga está designado como C, C/10 ó C<sub>10</sub> significa que el grado de descarga es el grado que causa descarga completa en 10 horas.

Una secuencia de carga y descarga se llama ciclo. Un ciclo profundo significa que mucha energía ha sido liberada (digamos 70%). Un ciclo superficial significa lo opuesto.

La vida de la batería está definida como el número de ciclos después del cual la capacidad total cargada es sólo el 80% de lo que era al principio.

La autodescarga significa que la energía se pierde dentro de la batería, aún si no se le aplica carga alguna. La autodescarga es bastante rápida. Uno no debe sorprenderse si un porcentaje de la carga se pierde en un día.

La sobrecarga puede ocurrir cuando todo el material en la batería ha sido convertido a la forma de carga, la batería está "llena". Si la carga continúa pueden suceder diferentes reacciones químicas que producen oxígeno e hidrógeno. Esto se llama "gasificar". La gasificación lenta no es problema, es aún algo bueno ya que el líquido en la batería es mezclado.

Algunos diferentes tipos de baterías son:

- Batería sellada que es completamente cerrada. No hay riesgo de contacto con el otro y no requiere de reposición de agua
- Batería seca (gelled battery), donde el líquido es convertido en una especie de gelatina, impidiendo que fluya
- Batería ventilada que tiene una especie de tapa especial que puede abrirse por seguridad
- Stand by (también en flotación) significa que la batería se mantiene cargada todo el tiempo. Sólo se utiliza en emergencias.

#### Ejercicio 3.4:

La capacidad de una batería es de 100 Ah. Si se utiliza un sistema de 12 V, ¿cuánto tiempo podrá permanecer encendida una lámpara de 20 W? Se puede emplear 80% de la capacidad de la batería.

## 3.5 Componentes electrónicos

#### 3.5.1 Controlador de voltaje

Un controlador de voltaje (o regulador) es necesario para evitar la sobrecarga y descarga profunda de las baterías. El tipo más sencillo de controlador simplemente revisa si el voltaje sobre los terminales de la batería no está muy alto. Básicamente es un transistor de circuito sencillo. Si el voltaje límite es alcanzado, la carga se detendrá hasta que el voltaje de la batería haya descendido hasta un cierto límite, o la carga puede continuar a una proporción muy pequeña sólo para compensar la autodescarga.

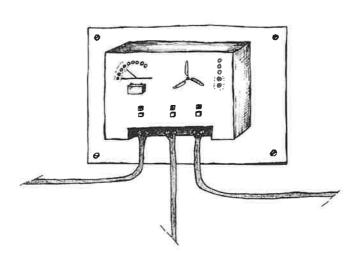


Figura 3.14: Controlador de voltaje

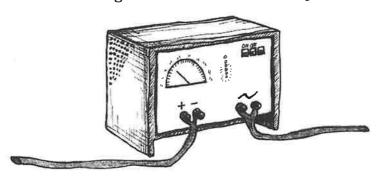
Como el voltaje es dependiente de la temperatura, los controladores de voltaje suelen tener dispositivos para compensar temperatura. Los modelos más sofisticados también revisan si la batería no se ha descargado demasiado. Esto puede indicarse (por ejemplo con una luz) o la carga puede desconectarse.

Los controladores de estado sólido deben preferirse sobre los controladores con conmutadores de relay "antiguos" porque son más confiables. A menos que sea un experto en electrónica no es recomendable construir controladores y esas cosas usted mismo. Mejores son los que puede comprar.

#### 3.5.2 Inversor

Un inversor es un dispositivo que convierte la corriente continua (CC) a corriente alterna (CA). Se utilizan para artefactos que requieren CA (algunos artefactos o bombas de agua) o para hacer conexiones a una red CA.

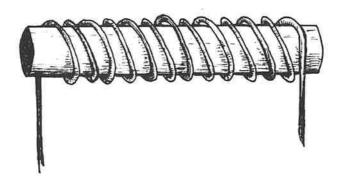
Figura 3.15: Inversor de voltaje



# 3.5.3 Balastro (dump load)

Un balastro se utiliza cuando la batería está llena y el viento sigue soplando. Como no es aconsejable tener el rotor funcionando sin carga, la energía debe ser enviada a algún lugar. Un balastro es simplemente un resistor (o transistor de potencia) que puede concebirse como un calentador eléctrico. En algunos casos es posible hacer corto circuito en el generador (lo que actuará como un freno).

Figura 3.16: Balastro



#### 3.5.4 Cables

Además de la confiabilidad, el único criterio para escoger cables es la caída de voltaje. Debido a que los sistemas solares y eólicos a pequeña escala operan típicamente a bajos voltajes (12 ó 24V) los cables grandes se requieren para evitar grandes pérdidas de energía y caídas en el voltaje (si el voltaje cae mucho, los dispositivos no funcionarán más).

Incidentalmente, una mala conexión eléctrica en un sistema de bajo voltaje tiene el mismo efecto que el cable que es demasiado delgado: es una resistencia grande. Por tanto es una buena política revisar todas las conexiones meticulosamente.

Como regla general, una cantidad razonable de caída de voltaje es del orden del 5% del dispositivo de una batería. La caída del voltaje se calcula fácilmente con la Ley de Ohm:

$$\Delta U = I \times R = I \frac{\rho \times L}{A}$$
 (3.3)

Empleando la potencia eléctrica:

$$P = U \times I \tag{3.4}$$

Se halla:

$$\Delta U = \frac{P}{U} \frac{\rho \times L}{A} \tag{3.5}$$

Donde:

A sección de cable [mm<sup>2</sup>]

I corriente [A]

L largo de cable (¡suma desde y hasta el dispositivo!) [m]

P potencia del dispositivo [W]

U voltaje del sistema [V]

ΔU caída de voltaje [V]

ρ resistencia específica del cobre = 0.018 [Ωm]

Para hallar el tamaño de cable A (sección de cable), la fórmula puede reescribirse a:

$$A \ge \frac{-\rho \times I \times L}{\Delta U} = \frac{\rho \times P \times L}{U \times \Delta U}$$
 (3.6)

De las fórmulas puede verse que un sistema de 24 V es mejor que uno de 12 V porque hay menos voltaje con los mismos cables y por lo tanto menor pérdida de energía.

## **Ejemplo**

Tome una carga de 100 W a 15 m de las baterías en un sistema de 24 V. ¿Qué cable se necesita?

La caída de voltaje admisible está en 5% = 1.2V. Entonces uno busca la fórmula (3.4):

$$A = 0.02 \times 100 \times (2 \times 15) / (24 \times 1.2) = 2.1 \text{ mm}^2$$

Supongamos que el cable está disponible en múltiplos de 1 mm², entonces 3 mm² deben utilizarse.

En un sistema de 12 V la caída de voltaje de 5% es 0.6 V que sería aceptable. Entonces la fórmula (3.3) nos da:

$$A = 0.02 \times 100 \times (2 \times 15) / (12 \times 0.6) = 8.4 \text{ mm}^2$$

Note la gran diferencia.

#### 3.6 Torre

#### 3.6.1 Introducción

#### Función

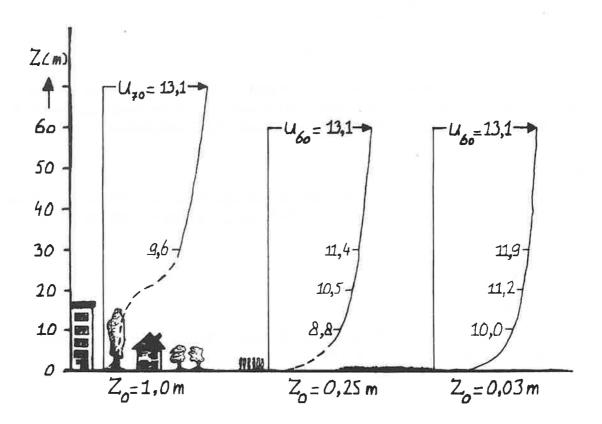
La función de la torre es llevar al rotor a una altura donde haya viento suficiente, es decir, por encima de los obstáculos cercanos. Se utilizan comúnmente tres tipos de torre:

- torre tubular de acero
- torre tubular de acero con tensores
- torre estructural (con perfiles de acero)

#### Deslizamiento del viento

El viento siempre baja de velocidad cerca al nivel del suelo. Este fenómeno se llama deslizamiento de viento (vea la figura 3.17). La figura muestra que el perfil del viento depende de la rugosidad del terreno z<sub>o</sub>. A mayor rugosidad, más bajará la velocidad del viento, y la torre deberá estar a una mayor altura para que el rotor experimente la misma velocidad de viento.

Figura 3.17: Perfil vertical de la velocidad del viento (Wieringa)



Para calcular el aumento de la velocidad de viento con la altura, se puede usar la siguiente fórmula:

$$V_2 = V_1 - \frac{\ln(h_2/z_0)}{\ln(h_1/z_0)}$$
 (3.7)

Donde:

h<sub>2</sub> altura (altura al eje del rotor) [m]

h<sub>1</sub> altura de referencia = altura donde se conoce la velocidad de viento [m]

V(h<sub>1</sub>) velocidad de viento a altura de referencia [m/s]

V(h<sub>2</sub>) velocidad de viento a altura (altura al eje del rotor) [m/s]

z<sub>0</sub> rugosidad del terreno

## Restricciones

La fórmula sólo puede usarse en áreas donde no haya colinas grandes u obstáculos en un rango de 1-2 km desde la turbina. La fórmula no debe usarse para alturas menores a 20 veces  $z_0$ . Por encima de vegetación continua (como un bosque) la línea "cero" debe tomarse a 0.5-0.75 veces la altura de la vegetación. La fórmula sólo es válida para velocidades de viento promedio.

## **Ejemplo**

¿Cuál es el efecto en un aerogenerador con 20 m de torre en lugar de una torre de 12 m si es usado en una campo abierto  $(z_0 = 0.03 \text{ m})$ ?

Complete la fórmula (3.7) para hallar:

$$V_{20} = ln (20/0.03) / ln(12/0.03) V_{12} = 1.09 V_{12}$$

La velocidad del viento es 9% más alta. Esto podría a lo máximo significar 29% más de salida. Para un cálculo exacto la nueva distribución de la velocidad de viento debe multiplicarse con la curva de potencia (ver capítulo "Diseño del sistema").

#### **Obstáculos**

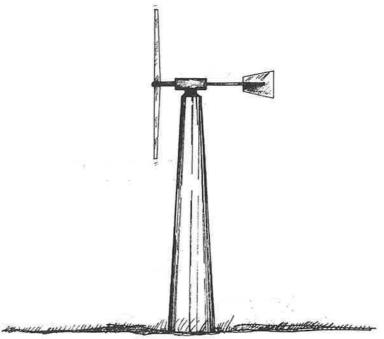
Idealmente no deberían haber obstáculos cerca a un aerogenerador. Sin embargo si los hubiese, ¿qué tan alta debería ser la torre? En la figura 3.17, se pueden hallar las respuestas para algunos obstáculos.

#### 3.6.2 Tipos de torre

#### Torre tubular

Una torre tubular consiste de tubos de acero, conectados rígidamente a la base, generalmente un bloque de concreto (vea la figura 3.18).

Figura 3.18: Torre de hierro tubular



#### Ventajas

- La construcción es fácil de fabricar.
- Prevención contra corrosión y pintura toman poco tiempo.
- Los cables pueden colocarse dentro de la torre.
- La torre puede construirse por partes que pueden unirse en el lugar elegido.

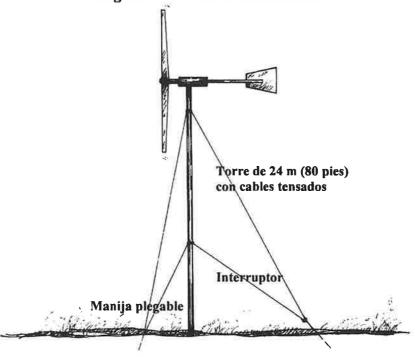
#### Desventajas

- Si el mismo tamaño de tubo es utilizado para toda la torre, el estrés de doblez (fatiga) más alto se da cerca a la base. Este estrés determina el tamaño de la torre, haciendo el resto de la misma innecesariamente pesada. Por lo tanto las torres para aerogeneradores grandes se hacen siempre de forma cónica, tienen menor diámetro a medida que suben
- La carga de viento en la torre es alta.
- Subir por la torre puede ser dificil.
- Los tubos pueden ser costosos.

#### Torre tubular con tensores

Si la torre tubular está sujeta por tensores (tres o más) ya no tendrá que ser tan pesada porque los tensores toman fuerza. Sin embargo usar tirante requiere de bloques de concreto extra y más espacio. También los tensores generalmente deben revisarse para asegurarse de que no se hayan aflojado. Vea la figura 3.19.

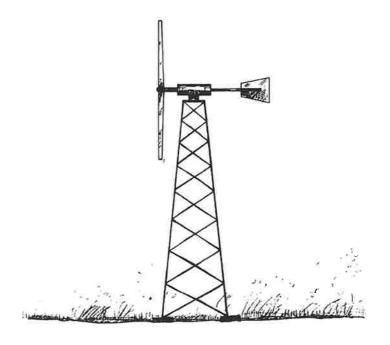
Figura 3.19: Torre con tensores



# Torre estructural

Una torre estructural consiste en perfiles de fierro o de palos tubulares conectados (vea la figura 3.20). Puede ser triangular o cuadrado.

Figura 3.20: Torre de maderaje



#### Ventajas

- Es fácil de fabricar
- Se requiere de pocos materiales (porque la torre puede tener la forma deseada)
- Puede ensamblarse en el lugar y es fácil de transportar
- Las cargas de viento en la torre pueden ser menores
- La torre puede escalarse fácilmente.

#### Desventajas

- La construcción es una labor intensa, tanto para fabricarla como para ensamblarla
- Prevención de corrosión y pintado toman tiempo
- Se requiere de inspección continua de cerradura
- Los cables no pueden colocarse dentro.

#### Ejercicio 3.5:

Usted es un cliente que desea comprar un aerogenerador. El fabricante le ofrece uno del tamaño adecuado, pero usted debe escoger entre una torre de 20 m y una de 30 m. La segunda opción encarecerá el costo total en un 5%. ¿Vale la pena realizar la inversión adicional? Tome en cuenta que la velocidad promedio del viento es de 6 m/s a 10 m de altura y que colocará el aerogenerador en una zona desértica.

#### 3.7 Caja de engranajes

Una caja de engranajes es un componente muy delicado, y es difícil de fabricar. Es mejor evitarlas en cargadores de viento. Las cajas de engranajes se usan en aerogeneradores grandes, en esos casos siempre son fabricadas por firmas especializadas.

## 4 DISEÑO DEL SISTEMA

#### 4.1 Introducción

Este capítulo describe el diseño del sistema. Se darán algunas pautas para determinar qué tan grande debería ser toda la instalación y cómo pueden seleccionarse los componentes individuales. La mejor estrategia es ir por los componentes probados que pueden comprarse, por tanto la tarea de diseñar componentes por usted mismo no se trata en este curso.

Los temas que se discutirán son:

- cálculo de la demanda y el suministro de energía
- determinación del tamaño del componente
- ¿qué debemos buscar cuando compramos algo?

Vea la figura 4.1 para darse una idea general de los componentes del sistema.

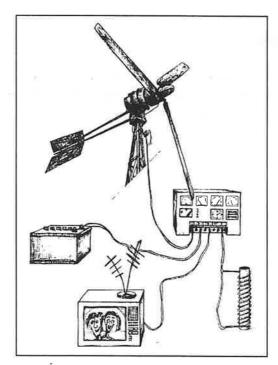


Figura 4.1: Vista general del sistema

#### Estos componentes son:

- 1. Turbina de viento (generador). Función: generación de electricidad. La turbina de viento generalmente incluye un rectificador para obtener corriente directa de 12 o 24V.
- 2. *Unidad de control*. Función: mantener el voltaje correcto, protección contra sobrecarga y descarga de baterías. Posible frenado del rotor.
- 3. Baterías. Función: almacenamiento de energía para períodos sin viento.
- 4. Dispositivos para DC de 12 o 24 V.

# Otros componentes podrían ser:

- 1. Balastro (Dump load). Función: tomar la electricidad si la batería está llena y la producción es mayor que el consumo.
- 2. Inversor. Función: convierte la corriente directa a 110 o 220 V (corriente alterna).
- 3. Dispositivos para AC de 220 V.

## 4.2 Demanda de energía

Lo primero que se debe hacer al diseñar un sistema es determinar cuáles son las demandas del usuario. Luego debe tomarse una decisión sobre qué sistema usar: recuerde que es posible que otra opción a la de la energía eólica sea una mejor alternativa así que mantenga una mente abierta.

## 4.2.1 Consumo de electricidad de dispositivos

Un sistema de aerogenerador puede ser acoplado a cualquier artefacto eléctrico. La tabla 4.1 muestra las potencias de los electrodomésticos más comunes y los consumos mensuales. Esta tabla es de utilidad para estimar rápidamente los requerimientos energéticos de una pequeña instalación, con miras a dimensionar los sistemas de generación y baterías.

Tabla 4.1: Requerimiento típico de potencia de algunos artefactos

ARTEFACTO	POTENCIA [W]	CONSUMO MENSUAL [kWh]		
Tubo fluorescente e inversor	12 – 40	1.44 - 4.8		
Foco de filamento	25 – 100	3 - 12		
Radio casetera	12 – 30	1.44 - 3.6		
Televisor pequeño B/N	20	1.8		
Televisor pequeño a color	50	4.5		
Computadora pequeña	10	0.2		
Refrigerador	100 – 400	24 - 96		
Horno microondas	1,000	7.5		
Calentador eléctrico	1,500	3.75		
Unidad de aire acondicionado	1,300	105		
Secador de cabello	300	0.5		
Secadora	4,800	80		
Aspiradora	540	3		
Cafetera	850	8		
Plancha	1,050	11		
Frigorífico	235	38		
Congelador	330	30		
Licuadora	290	1		
Grill	1,050	2.5		
Lavaplatos	1,200	28		
Lavadora (automática)	375	5		
Lavadora (manual)	280	4		
Máquina de coser	75	1		

La tabla ofrece valores promedio, en lo posible utilice los datos marcados en los mismos artefactos.

Es importante que se elijan los artefactos con la eficiencia más alta: la forma más económica de producir energía es ahorrándola. Por tanto los tubos fluorescentes deben preferirse por encima de los focos de filamento, pues producen mucha más luz de la misma cantidad de energía. La electricidad debería preferentemente no usarse para calentar o para aire acondicionado.

## 4.2.2 Patrón de consumo de energía

#### Demanda promedio

Si los artefactos que se desean son conocidos al momento de utilizarse, el consumo de energía puede hallarse. Es cuestión de multiplicar y sumar. Suponga que un radio utiliza  $10~\mathrm{W}$  y funciona durante 5 horas, entonces el consumo de energía durante ese tiempo es  $10~\mathrm{W}$  por 5 horas =  $50~\mathrm{Wh} = 0.050~\mathrm{kWh}$ . Vea la tabla  $4.2~\mathrm{para}$  ejemplos.

Tabla 4.2: Cálculo del consumo de energía para un día (ejemplo)

ARTEFACTO	POTENCIA [W]	TIEMPO [horas/día]	ENERGÍA [Wh/día]
Lámpara de tubo comedor	8	4	32
Lámpara de tubo cocina	8	2	16
Foco lavandería	10	1	10
Foco dormitorio	20	1	20
Televisión a color	50	4	200
Radio casetera	5	4	20
Refrigerador	100	12	1,200
TOTAL			1,498

Al funcionar, el refrigerador usará 100 W, pero no funcionará todo el tiempo. El refrigerador tiene un termostato (interruptor de temperatura). Suponga que la temperatura máxima permitida es de 4 grados centígrados, entonces el termostato pondrá al refrigerador en acción cuando se alcancen los 4 grados. Para evitar el encendido sinfín, el refrigerador seguirá funcionando hasta que la temperatura alcance por ejemplo 1 grado centígrado. Entonces el termostato desconecta el refrigerador y la temperatura dentro de éste se eleva nuevamente, hasta que se alcance los 4 grados centígrados. Luego hay otro encendido, etc. Por lo tanto el refrigerador que está en "ON" todo el día, está estimado a funcionar sólo la mitad de este tiempo.

En el ejemplo el requerimiento de energía es de 1,498 Wh por día = 1.5 kWh. Esto equivale a una potencia de consumo promedio de (dividir entre 24 h):

$$P = \frac{1,498 \text{ Wh}}{24 \text{ h}} = 62 \text{ W} \tag{4.1}$$

#### **Observaciones**

Calcular la demanda promedio es algo directo. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que si la electricidad está disponible, la demanda irá en aumento.

Para sistemas más grandes es posible separar la demanda en "esencial" y "no esencial". Si las baterías están bajas, las cosas "no esenciales" pueden desconectarse automáticamente. Examinando con cuidado lo que realmente es necesario, puede reducirse costos de inversión.

Una pregunta que debe uno hacerse es: ¿es necesario usar electricidad?. Por ejemplo, el uso de gas licuado puede ser una alternativa.

#### Patrón de demanda

Para establecer la cantidad de baterías requeridas, debe calcularse un patrón de demanda. Asumamos que todas las lámparas y la TV se usan por las tardes desde las 19:00 hasta las 23:00 horas. Todas juntas necesitan 300 W en este tiempo. Si estos 300 W se reparten durante 4 h obtenemos 300/4 = 75 W de consumo promedio.

Dado que las noches son más frías que el día, el refrigerador funcionará durante el día más que en la noche. La potencia promedio durante el día es de 50 W. Para simplificar las cosas, asumamos que desde las 08:00 hasta las 20:00 horas la potencia promedio es de 75 W y que desde las 02:00 hasta las 08:00 horas 25 W.

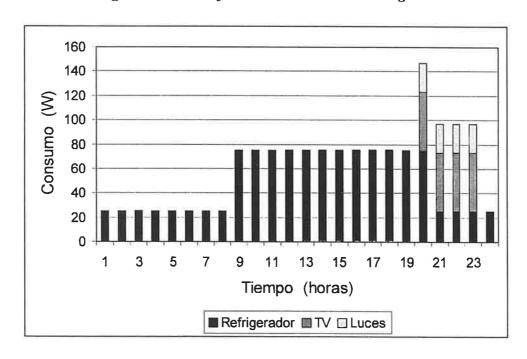
Finalmente, el patrón de demanda es como se ve en la tabla 4.3. Note que los artefactos pequeños han sido agrupados por simplicidad; el margen de error en los cálculos de demanda y suministro es tan grande que no tiene caso incluir todos los detalles.

Tabla 4.3: Patrón de consumo de energía para un día (ejemplo).

TIEMPO [Hrs]	ARTEFACTOS	POTENCIA [W]	ENERGÍA [Wh]
0 - 8	Refrigerador (bajo)	25	200
8 - 19	Refrigerador (alto)	75	825
19 – 20	Refrigerador (alto) luces, TV, radio casetera	150	150
20 - 23	Refrigerador (bajo) luces, TV, radio casetera	100	300
23 - 0	Refrigerador (bajo)	25	25
		Promedio = 62	1500

Es conveniente hacer un gráfico de esto (vea la Figura 4.2.)

Figura 4.2: Gráfico de la demanda de energía



## 4.3 Suministro de energía

Cuando la demanda promedio de energía se conoce así como la velocidad promedio del viento, el tamaño del aerogenerador que se requiere puede calcularse.

# 4.3.1 Cálculo sencillo de la salida (producto de salida)

Un primer cálculo de suministro de energía puede hacerse usando la siguiente regla:

$$P_{S} = e \times A \times V^{3} \tag{4.2}$$

Donde:

A área barrida por el rotor =  $\pi R^2 = \pi D^2/4$ 

e factor de energía, generalmente 0.15...0.30.

P<sub>S</sub> potencia promedio disponible (suministro)[W]

V velocidad promedio de viento [m/s]

Dependiendo del periodo considerado, la velocidad promedio de viento puede ser un promedio mensual o anual.

Si el promedio de demanda de potencia  $P_D$  se conoce, el diámetro del rotor D puede calcularse escribiendo la fórmula anterior. Si el promedio de demanda  $P_D$  es tomado para igualar el promedio de suministro  $P_S$ , entonces (con e = 0.20):

$$D = 2.5 \times \sqrt{(P_D/V^3)}$$
 (4.3)

## **Ejemplo**

Suponga que la demanda promedio es de 62 W (calculado en la sección 2.2) y que el mes con la menor velocidad de viento tiene un promedio de velocidad de viento de 4 m/s. Entonces diámetro del rotor que se requiere se calcula en:

$$D = 2.5 \text{ x} \sqrt{(62/4^3)} = 2.5 \text{ m}$$

Note que la regla sólo es para dar una idea global de que si la energía eólica es factible, y no para cálculos exactos. Por ahora se ha seleccionado un aerogenerador con un rotor de diámetro de D = 2.5 m. Vea más adelante cómo hacer cálculos más exactos.

## Ejercicio 4.1:

Si se duplica la velocidad del viento, por ejemplo, de 4 a 8 m/s, ¿qué pasará con la energía?

#### 4.3.2 Cálculos mejorados de la salida

#### Utilizando los estimados del fabricante

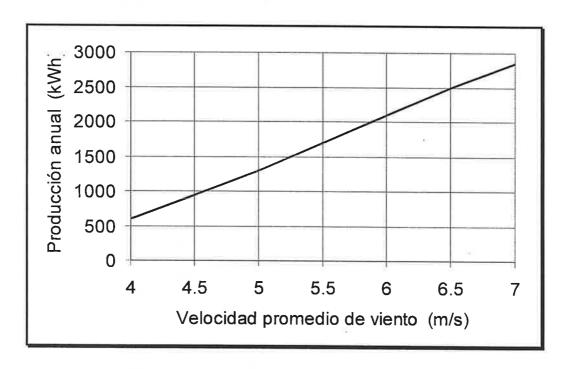
A veces el fabricante ofrece un estimado de la salida (producto de salida) como una función de la velocidad promedio del viento. Esto puede presentarse en una tabla (ver tabla 4.4) o en un

gráfico (ver figura 4.3 de la siguiente página). Con estos datos siempre debería determinarse a qué altura se hicieron las mediciones de la velocidad del viento.

Tabla 4.4: Ejemplo de los datos de salida de un fabricante como una función de la velocidad del viento (velocidad del viento a altura del cubo, rotor del diámetro 2.5m). Los datos debajo de la doble línea se derivan de aquellos sobre esta misma línea.

Velocidad promedio Del viento [m/s]	4	5	6	7
Salida anual [kWh]	600	1,300	2,100	2,900
Salida mensual [kWh]	50	108	175	242
Salida mensual Promedio [W]	71	148	241	331

Figura 4.3: Estimación de la producción de electricidad por una turbina eólica



## Ejemplo

En el mes crítico la velocidad del viento es de 4.2 m/s, la salida mensual puede ser calculada por interpolación entre 4 y 5 m/s en 62 kWh ú 86 W.

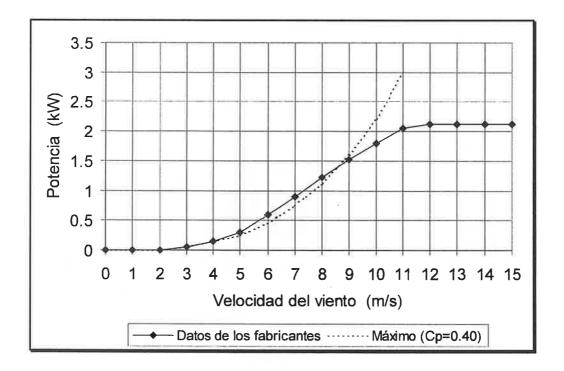
# Utilizando la distribución de la velocidad del viento y la curva de la potencia de la velocidad del viento

Los resultados más exactos pueden hallarse combinando las mediciones de la distribución de la velocidad de viento y las mediciones de la curva de la potencia de la velocidad del viento de un aerogenerador.

En el capítulo titulado "Recursos Eólicos" se describe cómo hallar la mejor distribución de la velocidad del viento (el mejor cálculo). Más aún, debe conocerse la curva de la potencia de la velocidad de viento de un aerogenerador, que da la potencia calculada para cada velocidad de viento. Vea la figura 4.4 para un ejemplo. Esta curva puede obtenerse del fabricante del aerogenerador. Si una curva P – V va a usarse beneficiosamente, debe conocerse:

- A qué altura fue medida la velocidad del viento
- Cuál fue la densidad del aire (o temperatura y presión)
- Qué unidades se usaron (por ejemplo, millas por hora [mph] en lugar de m/s).

Figura 4.4: Ejemplo de una curva de potencia (a 3.4 m) y de potencia máxima



Es buena idea comparar la curva P - V con el máximo producto de salida (output) posible, dado por:

$$P_{\text{max}}(V) = C_{P,\text{max}} \times (\rho/2) \times (\pi/4) \times D^2 \times V^3$$
(4.4)

#### Donde:

Si la curva del fabricante está muy por encima de la línea de potencia máxima, la curva P-V puede estar errada. Si no se dispone de mejores datos, por lo menos corrija la curva de potencia dada hacia abajo a la potencia máxima posible. Vea la figura 4.4 como ejemplo.

Ahora supongamos que tanto la distribución de la velocidad de viento y una buena curva de potencia se conocen. Entonces el total anual (o mensual, si se considera un mes) de producto de salida (output) se halla multiplicando el número de horas de viento con una velocidad específica por la salida esperada a esa velocidad (vea la figura 4.5).

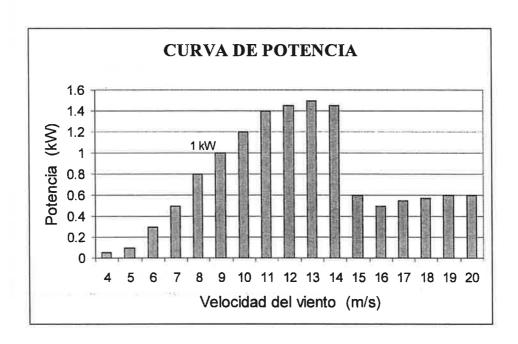
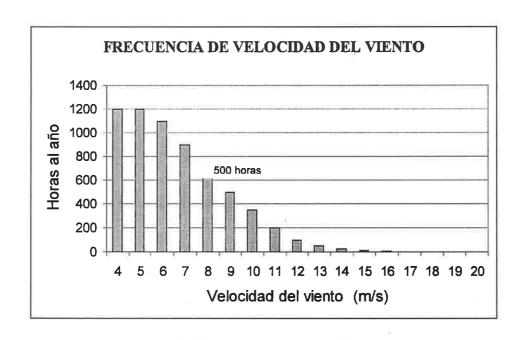
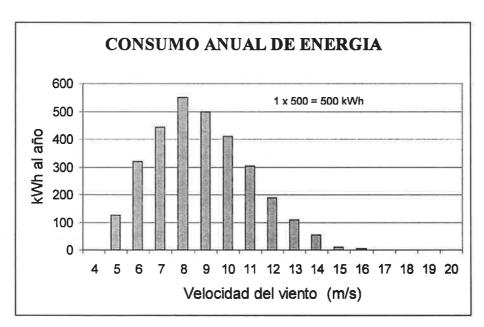


Figura 4.5: Cálculo de la producción de electricidad





## **Ejemplo** (vea la figura 4.5)

Para cierto aerogenerador la curva de potencia indica que la potencia de 35 W debe esperarse a una velocidad de viento de 5 m/s. Durante el 11% del tiempo el viento está entre 4.5 y 5.5 m/s. ¿Cuál es la salida (producto de salida) para este intervalo de velocidad de viento?

Respuesta: el tiempo total es  $0.11 \times 365 \times 24 = 964$  h La salida es de 35 W. Entonces la energía es  $E = 35 \times 964 = 33,740$  Wh = 33.7 kWh. Repitiendo el procedimiento para cada intervalo de velocidad de viento se puede hallar el output total anual.

#### 4.3.3 Estimar los datos de velocidad de viento

Los mejores datos que se pueden tener son los datos de viento del lugar de instalación previsto. Nada puede ser mejor que eso. Sin embargo, en muchos casos éstos no están disponibles y debemos utilizar datos que tenemos.

Si se cumplen los siguientes requerimientos, los datos de una estación meteorológica pueden utilizarse:

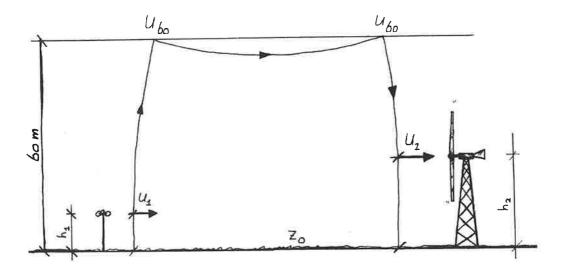
- 1. Los datos de la estación deben ser confiables
- 2. La estación no debe estar muy alejada, digamos dentro de los 100 km.
- 3. Entre la estación y el lugar de instalación del equipo debe haber un terreno plano ininterrumpido y homogéneo.

Esto significa que en una área montañosa los datos que no son del lugar mismo son virtualmente inservibles. En estos casos deben obtenerse datos locales primero.

#### Transformación de la velocidad del viento

Si se cumplen con ciertos requerimientos (ver parte anterior) es posible estimar la velocidad del viento en el lugar con un procedimiento de dos pasos (figura 4.6). Esto ya fue discutido en el capítulo "Recursos Eólicos".

Figura 4.6: Cálculo de la velocidad del viento en el sitio del molino (transformación hacia arriba y hacia abajo)



- 1. Halle la velocidad del viento a 60 m de altura a partir de la velocidad de viento en la estación meteorológica
- 2. Halle la velocidad del viento en el lugar de la velocidad del viento a 60 m

Las fórmulas eran, para la transformación hacia arriba:

$$V_{60} = V_{ha} \cdot \frac{\ln (60/z_{oa})}{\ln (h_a/z_{oa})}$$
 (4.5)

Y para la transformación hacia abajo:

$$V_{Hs} = V_{60} \cdot \frac{\ln(H/z_{os})}{\ln(60/z_{os})}$$
(4.6)

Combinando ambas transformaciones (4.5) y (4.6) arroja:

$$V_{Hs} = \frac{\ln(H/z_{os})}{\ln(60/z_{os})} \times \frac{\ln(60/z_{oa})}{\ln(h/z_{oa})} \times V_{ha}$$
(4.7)

Donde:

h = altura de anemómetro [m]

H = altura del cubo del rotor [m]

 $z_{0a}$  = rugosidad de terreno en ubicación del anemómetro [m]

 $z_{0s}$  = rugosidad de terreno en ubicación del aerogenerador.

U<sub>ha</sub> = velocidad de viento medida por anemómetro [m/s]

U<sub>Hs</sub> = velocidad de viento en el lugar a altura del cubo [m/s]

Note que esta transformación debe realizarse separadamente para cada sector de 30 o 45 grados.

#### **Ejemplo**

Suponga que la velocidad del viento es medida en una estación meteorológica a 100 km del lugar (un aeropuerto). Los datos de velocidad del viento para el aeropuerto indican un promedio de velocidad del viento de 4.5 m/s. La rugosidad en el aeropuerto es  $z_0 = 0.03$  (en todas direcciones) y la altura medida es de 18 m.

En el lugar proyectado para ubicar la turbina, la rugosidad es de  $z_0 = 0.10$  m. Por el momento la altura de la turbina está calculada en 10 m. Cuál es la velocidad promedio del viento en el lugar de ubicación de la turbina?

#### Respuesta

La respuesta se halla en la transformación de la velocidad del viento del aeropuerto hasta 60 m de altitud y luego bajar a 10 m en el lugar de ubicación de la turbina. La velocidad del viento a 60 m de altitud es:

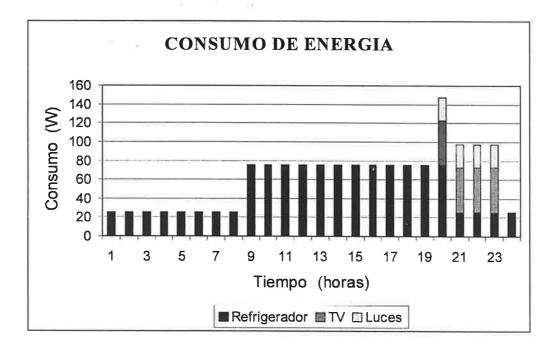
$$V_{60} = V_{ha} \ln(60/0.03) / \ln(18/0.03) = 4.5 \times 1.19 = 5.35 \text{ m/s}.$$

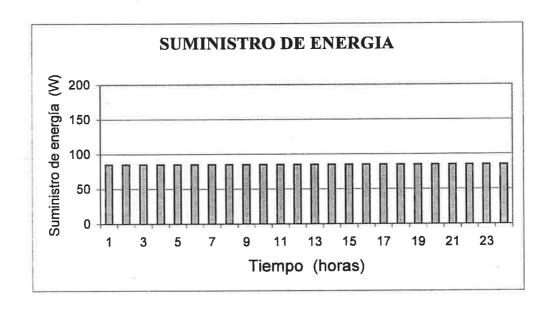
Por tanto la velocidad del viento en el lugar de ubicación de la turbina es:

$$V_{Hs} = V_{60} \ln(10/0.1) / \ln(60/0.1) = 5.36 \times 0.72 = 3.85 \text{ m/s}$$

Vea la figura 4.7a para una representación gráfica de la transformación. Si el total de la energía de salida se ha hallado, una corrección para densidades de aire diferentes debe realizarse para obtener una respuesta final.

Figura 4.7a: Comportamiento del sistema si hay viento constante: demanda y oferta





#### Cálculos con un programa de computadora

Todo el cálculo es básicamente una repetición de cálculos sencillos; todo se hace mejor en una hoja de cálculo. El resultado de tal hoja de cálculo se da en la siguiente tabla.

Tabla 4.5: Ejemplo de cálculos exactos de salida (output) de un aerogenerador

Entradas Velocidad promedio del viento Altura del anemómetro Rugosidad del terreno en el lugar del anemómetro Altura del núcleo del rotor del generador Rugosidad del terreno en el lugar del generador	4.5 m/s 18 m 0.03 m 10 m 0.1 m
Densidad de la curva Altitud Temperatura Presión Diámetro del rotor	1.225 kg/m <sup>3</sup> 1000 m 8.5 °C 89,619 Pa 2.5 m
Salidas Densidad del aire en el lugar de la turbina Factor de corrección de potencia	1.109 kg/m <sup>3</sup> 0.9
Velocidad promedio del viento en el lugar de la turbina	3.85 m/s

Salida anual de energía Potencia promedio Factor de energía 730 kWh 83 W 0.30

Uavg (m/s)	U1 (m/s)	U2 (m/s)	P(U) (W)	Prob (-)	Tiempo (hr)	Energía (kWh)
/ <u>a</u> 1	0	0.5	ě	0.013	115	-
1	0.5	1.5	0	0.099	870	0
2 3	1.5	2.5	0	0.170	1486	0
3	2.5	3.5	10	0.196	1714	17
4	3.5	4.5	45	0.181	1582	71
5	4.5	5.5	120	0.141	1232	148
6	5.5	6.5	200	0.095	829	166
7	6.5	7.5	270	0.056	489	132
8	7.5	8.5	370	0.029	254	94
9	8.5	9.5	470	0.013	117	55
10	9.5	10.5	580	0.005	48	28
11	10.5	11.5	700	0.002	17	12
12	11.5	12.5	780	0.001	6	4
13	12.5	13.5	860	0.000	2	1
14	13.5	14.5	940	0.000	0	0
15	14.5	15.5	980	0.000	0	0
16	15.5	16.5	1000	0.000	0	0
	TO	TAL		1.000	8760	729

El promedio de salida de la turbina es 83 W. Esto es más que los 62 W requeridos en el ejemplo. Sin embargo, mucha de la electricidad no es utilizada directamente sino más bien almacenada en la batería primero, hay considerables pérdidas dado que la eficiencia de una batería es sólo de 80% más o menos (90% para carga y 90% para descarga). Suponga que la mitad de la electricidad es utilizada directamente de la turbina y la otra mitad es almacenada primero. El promedio de salida debe corregirse a:

$$P = 83/2 + 83/2 \times 0.80 = 75 W$$

#### Altura de la torre

Usando la hoja de cálculo es fácil hallar cuál es la influencia de una altura diferente en la torre en la energía de salida. Simplemente cambie la altura de la torre y el cálculo se rehace automáticamente. La energía de salida extra puede pesarse contra el costo extra que implica hacer una torre más grande.

#### 4.3.4 Resumen

Los pasos que pueden seguirse para llegar a calcular una salida estimada se detallan a continuación:

1. Haga un cálculo a grosso modo con la regla de tres

Si el resultado es prometedor, se necesita realizar un cálculo mejor. Hay dos posibilidades. La primera es:

2. Utilice los datos de salida del fabricante

La segunda y mejor es:

3. Utilice una curva P – V ya medida y revisada.

En lo que concierne a los datos, lo mejor es:

A. Tome los datos en el mismo lugar.

Las alternativas son:

- B. Cálculos en el lugar (por ej. de vegetación)
- C Cálculos de una estación

Eiercicio 4.2:

Si la velocidad del viento se duplica, su contenido de energía será 8 veces mayor. En este caso, ¿la potencia de salida del aerogenerador será, también, 8 veces mayor?. Revise la curva de potencia de salida de un aerogenerador Proven de 3.4 m. a V = 4 m/s y V = 8 m/s (vea la figura 4.4).

Ejercicio 4.3:

Elabore una lista de recomendaciones para determinar la curva de potencia de un molino.

Ejercicio 4.4:

Se pretende instalar un aerogenerador con el fin de que abastezca la energía necesaria para este curso. El aerogenerador tiene un rendimiento promedio de e=0.25. La velocidad promedio del viento es 5 m/s.

- 1. ¿Cuál será el consumo total de energía eléctrica? (Considere sólo las luces).
- 2. ¿Cuál será el diámetro del rotor?

#### Ejercicio 4.5:

Un fabricante le proporciona los datos de un molino cuyo rotor tiene 4 m de diámetro: Con una velocidad promedio de 5 m/s, su producción de energía es de 94 kWh diarios.

- 1. Calcule la potencia eléctrica promedio, aplicando la regla de la velocidad al cubo.
- 2. Calcule la energía diaria.
- 3. ¿Qué opina de los datos proporcionados por el fabricante?

#### 4.4 Almacenamiento

#### 4.4.1 Consideraciones generales

Utilizando el consumo de energía promedio y los datos de viento requeridos, se puede establecer el tamaño de la turbina. Ahora necesitamos determinar el tamaño de la batería.

#### El mejor almacenamiento es el almacenamiento cero

Lo mejor que se puede hacer es evitar un almacenamiento de electricidad en su conjunto. Lamentablemente, no hay muchos casos en los que esto es posible. El caso del bombeo de agua es uno de ellos, ya que el agua puede almacenarse en lugar de la electricidad.

Otra posibilidad de almacenamiento es una red. Lamentablemente, no es muy económico acoplar pequeños aerogeneradores o paneles solares a una red, porque no recibe una compensación suficiente por la electricidad que se produce en forma privada.

Si el almacenamiento es absolutamente necesario, entonces debe calcularse el tamaño necesario.

#### Cálculos sencillos

Si observamos el viento, será raro encontrar un lugar donde el suministro de energía sea el mismo todos los días. En muchos de los casos, el viento fluctuará todo el tiempo. Debemos trabajar con probabilidades. La probabilidad de que haya energía disponible durante un largo periodo de almacenamiento es de 1.0 (seguro) (por ejemplo, suficientemente grande como para un mes sin vientos), y cero si no hay almacenamiento. Debemos hacer una elección en algún punto intermedio.

El criterio para dicha elección se basa en aceptar la posibilidad de que no hay energía disponible. Suponga que 1 día al año sin energía es aceptable. Debemos inspeccionar los datos climatológicos de algunos años y descubrir cuánto duran los periodos prolongados sin viento (definir "sin viento" por ejemplo como U < 2m/s). Vea la tabla 4.7 para un ejemplo

Tabla 4.7: Periodos sin viento (ejemplo)

Duración del periodo sin viento [días]	1	2	3	4	5	15
Número de periodos	16			_		
al año	12	6	4	2	1	1

La demanda de un día sin electricidad se da por hecho, la capacidad debe ser suficiente para 15 días (este es probablemente un mes sin viento que se da cada año). Ya que esto es muy costoso, se puede convencer al usuario de establecer entre 4 y 5 días de almacenamiento.

#### Métodos avanzados

Si están disponibles datos representativos del clima (no datos promedios) es posible predecir el comportamiento de todo el sistema en un año (por ejemplo incluyendo las pérdidas de energía cuando no hay viento pero la batería está ya llena). Entonces, es sólo cuestión de elegir la mejor capacidad de batería y ver qué sucede en los cálculos y cuántos días no tendremos electricidad.

El principio de dichos cálculos no es muy complicado, sólo que hay tantos detalles en qué pensar que solamente podría hacerse con un programa computarizado.

#### Demandas de energía y viento bien definidas

Si Ud. conoce en detalle la demanda de energía y del viento, entonces podrá hacer algunos cálculos a mano. Por ejemplo, un aparato de telecomunicaciones en el Caribe. En este caso, tanto la demanda como el suministro de energía (el viento casi siempre sopla en partes del Caribe) son casi constantes. Otro ejemplo es un faro o poste de luz en la calle: sólo hay demanda de energía por las noches. Si se trata de un faro solar, entonces el suministro de energía es sólo de día. Asumiendo dichos datos como constantes, podemos aplicar los siguientes principios de cálculos.

#### 4.5 Cálculos con el patrón de consumo de energía diario

#### Viento promedio durante el día

Para hacer el cálculo manejable, asuma que la entrada de energía del viento es constante (en el mes crítico) a un nivel promedio = 83 W; en una hora, la turbina generará 83 Wh. Luego, deberá investigarse el comportamiento de la instalación a lo largo de un día.

El uso promedio de energía es de 62 W, menor que 83 W, por lo tanto la batería probablemente esté llena al comenzar del día. Sin embargo, debemos revisar todas las posibilidades. Tomemos una batería de 1,000 Wh (capacidad nominal). Esto corresponde a 83 Ah a 12 V.

Vea la tabla 4.8. Durante la noche, desde las 00:00 hasta las 08:00 horas, el suministro de energía de la turbina es  $8 \times 83 = 664$  Wh. La demanda de energía es de  $8 \times 25 = 200$  Wh. Esto significa un sobre valor de 664 - 200 = 464 Wh.

Esta cantidad se coloca en la batería pero sólo con una eficiencia del 90%. Por lo tanto, la energía en la batería aumenta con  $0.90 \times 464 = 418$  Wh. Entonces, si empezamos con 100 Wh en la batería, la carga se eleva a 618 Wh. Sin embargo, si empezamos con 800 Wh en la batería, sólo podemos poner 200 Wh más, y 218 Wh se pierden.

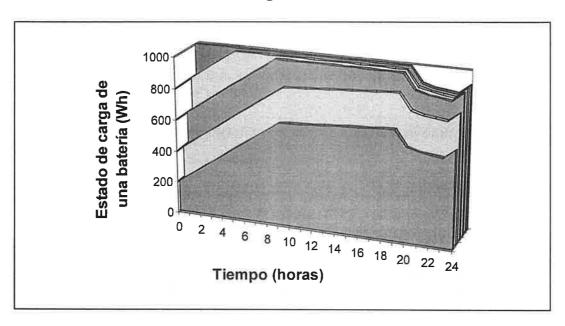
La batería no puede llenarse más allá del máximo (1,000 Wh), y no es posible obtener más de 800 Wh de ella, resultando en un nivel de 200 Wh = 20%.

Tabla 4.8: Comportamiento del sistema con suministro de energía continuo. Eficiencia de carga y descarga de la batería de 90%. Vea también la figura 4.7b

m.	Suministro	ıministro Demanda	ado I	Cambio en		Estado de	e carga en t	=0 h [Wh]	
Tiempo [h]	de energía [Wh]	de energía [Wh]	Disponible [Wh]	carga de batería [Wh]	200	400	600	800	1000
0.0	((1	200	+464	+418	618	818	1000*	1000*	1000*
0-8	664	825	+88	79	697	897	1000*	1000*	1000*
8-19	913							926	926
19-20	83	150	-67	-74	623	823	926		1
20-23	249	300	-51	-57	566	766	869	869	869
23-0	83	25	+58	52	618	818	921	921	921
	1992	1500	492	Profundidad del ciclo	418	418	400	200	131

<sup>\*</sup> Nivel máximo de carga.

Figura 4.7b: Comportamiento del sistema si hay viento constante: Estado de carga de la batería

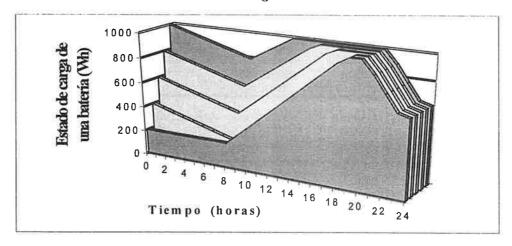


Note que con la mayoría de estos ciclos, el nivel al final del día no es el mismo que al comienzo (vea la figura 4.8).

Ya que en promedio, el aerogenerador produce más de lo requerido, lo más probable es que la batería esté llena al comienzo del día. Esto derivará en un ciclo superficial. Por ejemplo, si la batería está 100% cargada, el cambio en la carga sólo será de 200 Wh = 20% (ver tabla). En realidad, la batería de 300 Wh (50 Ah a 12 V) sería suficiente, resultando un patrón de ciclo:

300 - 300 - 300 - 226 - 169 - 221 - 300 etc.

Figura 4.8: Comportamiento del sistema si hay viento solamente durante el día: Estado de carga de la batería



Una situación completamente diferente ocurre si el viento sopla, por ejemplo, sólo durante el día desde las 8 a 20 h (ver Tabla 4.9). Si el estado de carga de la batería es menor que 422 Wh, entonces el nivel de carga baja a 20% de su capacidad total o menos (que es el nivel de carga más bajo posible en una batería, algo que debería evitarse).

Puede verse que cualquiera que sea el estado de carga al comienzo del día, el nivel al final es 639 Wh. Por lo tanto, una profundidad de ciclo de más o menos 600 Wh debe tomarse en cuenta (ver la columna de 600 Wh) y una batería de 100 Wh es definitivamente necesaria.

Tabla 4.9: Comportamiento del sistema con suministro de energía eólica sólo durante el día. Eficiencia de carga y descarga de batería de 90%.

	Suministro	Demanda	D: '11.	Cambio en		Estado de	carga en t	=0 h [Wh]	
Tiempo [h]	100 Energía de energía Disponible carga de	200	400	600	800	1000			
0-8 8-19 19-20 20-23 23- 0	0 1826 166 0	200 825 150 300 25	-200 +1001 +16 -300 -25	-222 900 14 -333 -28	200 1000 1000 667 639	200 1000 1000 667 639	378 1000 1000 667 639	578 1000 1000 667 639	778 1000 1000 667 639
20 0				Profundidad del ciclo	800	800	622	422	361

#### Conclusión

Aún con este sencillo ejemplo, queda claro que el patrón de suministro de energía eólica es bastante importante para determinar el tamaño de la batería requerida. Si estos datos no están disponibles, no tiene sentido realizar cálculos detallados y el tamaño sólo podrá estimarse.

#### Ejercicio 4.6:

En la oficina del SENATI hay: 10 lámparas de 24 W, que permanecen encendidas desde las 8 hasta las 18 horas y 3 computadoras de 110 W, que se usan también desde las 8 hasta las 18 horas. La máquina de café se utiliza, entre las 8 y las 18 horas, durante 10 minutos; su consumo es de 1,000 W.

1. Calcule la demanda diaria total de energía. Asimismo, calcule el consumo mensual (kWh en 30 días) y la potencia [W].

Carga	Potencia [W]	Tiempo [h]	Energía [Wh]
Lámparas			
Computadoras			
Máquina de Café			
TOTAL [Wh]			

- 2. Durante el mes crítico, la velocidad promedio del viento es 4.0 m/s, a la altura de cubo propuesta. Calcule el diámetro del rotor, aplicando la regla de la velocidad al cubo:  $P = 0.25 \times A \times V^3$ .
- 3. Usted tiene sobre su escritorio la curva de potencia de un molino que planea adquirir. Lamentablemente, alguien derramó café sobre el papel y tiene que calcular algunos datos nuevamente. Calcule la probabilidad, el número de horas y la energía por año ((k=2, V<sub>prom</sub> = 4 m/s). En primer lugar, calcule el parámetro de la escala A.

$V_{prom}$	$V_1$	V <sub>2</sub>	P(U)	Prob	Tiempo	Energía
(m/s)	(m/s)	(m/s)	(W)	(-)	(hr)	(kWh)
:2	0	0.5		0.012	115	:=:
1	0.5	1.5	0	0.092	809	0
2	1.5	2.5	0	0.16	1,398	0
3	2.5	3.5	0	0.188	1,644	0
4	3.5	4.5	0	0.178	1,559	0
5	4.5	5.5	100	-	-	-
6	5.5	6.5	500	-		-
7	6.5	7.5	900	0.062	547	492
8	7.5	8.5	1,500	0.034	301	452
9	8.5	9.5	2,200	0.017	148	326
10	9.5	10.5	3,000	0.007	65	196
11	10.5	11.5	3,400	0.003	26	88
12	11.5	12.5	3,500	0.001	9	32
13	12.5	13.5	3,400	0.000	3	10
14	13.5	14.5	3,100	0.000	1	3
15	14.5	15.5	2,900	0.000	0	1
16	15.5	16.5	2,800	0.000	0	0
TOTAL			•	1.000	8,760	2,167

4. Diseñe una batería con 5 días de autonomía, capaz de utilizar 70% de su capacidad nominal. Si el sistema opera a 12 V, ¿cuál será su capacidad en Ah?

Cierto día, no corrió viento de 4 m/s desde las 0 hasta a 12 h. Desde las 12 hasta las 17 horas, se registró una velocidad de 7 m/s, y luego, de 3 m/s. A las 0 h, el estado de carga de la batería era de 20 kWh (50% de 40 kWh). Al cargarse la batería, un 90% de la energía del molino entra en ella; al descargase, se puede utilizar un 90% su energía.

- 5. Determine el estado de carga (vea la tabla en la página siguiente):
  - a) Calcule el estado de carga inicial.
  - b) Determine el suministro de energía (vea la curva de potencia).

- c) Determine la demanda de energía.
- d) Determine la diferencia entre suministro y demanda; adapte el estado de carga de la batería. Tome en cuenta el rendimiento de carga y descarga.

Tiempo [h]	Suministro [Wh]	Demanda [Wh]	Diferencia [Wh]	Estado de carga [Wh]
0	-		<u> </u>	20,000
0 – 8	0	0	0	20,000
8 – 9				
9 – 12				
12 – 16				-
16 – 18				
18 - 24				

6. El diámetro del rotor es 4 m y la densidad del aire, 1.2 kg/m³. Controle el coeficiente de potencia a 7 m/s.

#### 4.6 ¿Cómo se selecciona un aerogenerador?: Recomendaciones

#### 4.6.1 Funcionamiento

El funcionamiento de la máquina es muy importante, en particular la curva de potencia - velocidad. Sin embargo recuerde que la confiabilidad de la máquina es aún más importante. El abastecedor debe ser capaz de proveerle la curva P-V (de no ser así, diríjase a otro).

La curva P - V, junto con los datos del viento (después de que se hayan hecho todas las correcciones), puede utilizarse para proyectar la salida del sistema del aerogenerador.

#### Optimismo en los estimados de producto de salida

Lamentablemente, no todas las curvas P-V pueden utilizarse tan fácilmente. Por una cuestión de marketing, las curvas de los fabricantes suelen ser muy optimistas.

La curva P-V debe delinearse teniendo en cuenta la velocidad del viento tomada a altura del cubo; sin embargo, este procedimiento no siempre es transparente. En algunas ocasiones, se utiliza la velocidad del viento a 10 m de altura. Esto puede hacer una gran diferencia, especialmente para sistemas muy grandes donde la altura del rotor alcanza hasta 60 m.

Tome conciencia de que la curva P-V fue probablemente hecha a nivel del mar, a una temperatura moderada. La densidad del aire para su aplicación podría ser menor.

#### Parte relevante de la curva P-V

Para turbinas pequeñas, la curva P - V entre 4 m/s y 10 - 12 m/s es la más importante. Por debajo de 4 m/s, ya no hay energía en el viento porque la velocidad del mismo es muy baja, por lo que no es importante si la turbina arranca, por ejemplo, a 2 m/s.

Por encima de 10 - 12 m/s no hay energía en el viento porque las velocidades así de altas casi nunca ocurren. Para turbinas grandes la curva P - V hasta 20 m/s pueden resultar importantes.

Note que la turbina que arranca a una velocidad de viento menor tendrá menos períodos sin producción de energía (pero la salida general podría ser menor).

#### Salida esperada

Para turbinas pequeñas (digamos hasta 10 m de diámetro) la salida promedio no es mayor a:

$$P = (0.15 .. 0.30) \times A \times V^{3}$$
(4.8)

Si el diámetro es mayor, entonces es difícil dar una cifra. Algunas investigaciones realizadas por los autores mostraron un límite superior de  $P = 0.5 \times A \times V^3$ .

#### 4.6.2 Generalidades

Al comprar una turbina deben tomarse en cuenta los mismos puntos cuando compramos algo costoso.

#### Confiabilidad: Experiencias

Pregunte a otras personas que han comprado una turbina cuál ha sido su experiencia. ¿Sus máquinas son confiables y funcionan adecuadamente?. ¿Con qué frecuencia necesitan mantenimiento?. Si se presentó un problema, ¿cuánto tiempo demoró en arreglarlo?. ¿El proveedor da garantías?. ¿Es posible obtener un contrato de servicios?

De ser posible, visite algunas de las turbinas del tipo que usted está pensando comprar. Averigüe cuál es la estación de servicio más cercana. Pregúntele al proveedor cuántas turbinas ha vendido ya. Debería estar en capacidad de brindarle nombres de algunos clientes para referencias.

#### **Ambiente**

Los factores más importantes son la velocidad máxima del viento que puede esperarse en el lugar de instalación (¿la velocidad del viento de supervivencia de la turbina es lo suficientemente alta?), y el rango de temperatura, la humedad y el contenido de sal de la atmósfera. La arena también podría ser un problema. Todos los soportes y el generador deberán estar, de preferencia, absolutamente cerrados (por ejemplo, de acuerdo al estándar IP55).

#### **Documentación**

La documentación también da confiabilidad en el fabricante. ¿Tomó mucho tiempo antes de que el fabricante le dé información? ¿Hay suficiente información relacionada a la máquina? Si la información no es muy clara, generalmente indica que la turbina no es confiable. Esto se aplica también a los manuales de instalación.

#### **Precio**

No hay máquinas muy baratas. Es simplemente imposible fabricar una máquina muy económica que también sea confiable. Busque información de algunas marcas conocidas. El precio de los competidores muy por debajo del promedio deben tomarse con desconfianza.

#### Acabado del producto

Algunos aspectos aparentemente superficiales pueden ser indicadores de calidad. ¿Las palas del rotor lucen fuertes? La máquina tiene un buen recubrimiento: pintura, o aún mejor, ¿está galvanizada? ¿El rotor y el cabezal se mueven suavemente?.

#### 4.6.3 Resumen

Asumiendo que hay viento suficiente para asegurar una exitosa aplicación de energía eólica, se deben seguir los siguientes 4 pasos:

- 1. Con respecto a la instalación de la turbina, averigüe sobre:
  - parámetros estimados de salida
  - requerimientos de mantenimiento
  - especificaciones climáticas.
- 2. Trate de verificar la confiabilidad de las diferentes turbinas. Piense en:
  - inspección de las máquinas
  - informes de pruebas
  - converse con algunos propietarios
  - el récord de trayectoria del fabricante
  - contratos de servicios
  - garantías.
- 3. Elija algunas turbinas (de ser posible, las más confiables) y haga un cálculo exacto de la salida. Preste atención a la salida total y la disponibilidad de salida.
- 4. Haga sus cálculos económicos.

#### 4.7 Miscelánea

#### Seguridad Eléctrica

Como sólo se utilizan 12 ó 24 V, no hay peligro alguno de descarga eléctrica. Sin embargo, los cortocircuitos pueden ser peligrosos. En el caso de un cortocircuito habrá mucha corriente en la batería, lo que causará calentamiento y posiblemente la ebullición del líquido. Tome en cuenta que el ácido puede fluir y salir. Un cortocircuito también puede provocar fuego debido al calentamiento de los alambres.

Uno debe tomar en cuenta especialmente los cortocircuitos durante la instalación (y posiblemente el desmantelado de la instalación), pues las conexiones aún no se han fijado y pueden haber cables sueltos.

Para evitar cortocircuitos en el sistema, éste debería contar por lo menos con un fusible. En el caso de que se produzca un cortocircuito, el fusible volará (se derrite) y no puede producirse mayor daño. Nunca reemplace un fusible que ha volado por un pedazo de alambre o un fusible más grande.

Podría necesitarse protección contra relámpagos. Ya que las turbinas están sobre una torre, existe la posibilidad de que se produzca una descarga. Para mayor información sobre seguridad eléctrica, consulte Roberts, entre otros [1].

#### Seguridad para niños

La instalación debe hacerse definitivamente con extrema seguridad para los niños. Las baterías deben estar siempre almacenadas fuera del alcance de ellos.

La turbina de viento debe ser instalada de tal manera que niños o personas no autorizadas no puedan trepar por la torre. Las personas que trepen por la torre podrían ser golpeadas por el rotor.

#### Reparaciones

Si deben hacerse reparaciones, el rotor siempre debe frenarse primero. Sólo se debe trepar a las torres con herramientas y aditamentos de seguridad (cuerdas, correas, etc.).

Consulte por ejemplo Gipe [2] para mayor información en lo que refiere a materiales para trepar (o algo por el estilo). Gipe también ofrece una lista de solución de problemas: cómo diagnosticar fallas sencillas, por ejemplo.

#### Cables tirantes

En el caso de las torres sujetas con tirantes, se debe realizar una revisión regular de estos cables. Una pérdida de tensión puede tener resultados desastrosos.

#### 5. EXPERIENCIA CON AEROBOMBAS Y AEROGENERADORES EN EL PERÚ

#### 5.1 Historia

En lo que respecta a técnicas de *bombeo con molinos de viento*, existen dos experiencias destacables: Miramar y Vichayal en el bajo Chira (Piura) con molinos rústicos tipo holandés, difundidos también a Lambayeque y La Libertad, y en la Urbanización semi-rural Pachacútec, en la periferia de Arequipa, difundida más tarde a Camaná, Puno, Tacna, Paracas y otras localidades del país.

En Miramar hay alrededor de 500 aerobombas, construidas de madera y esteras y usadas por los campesinos locales para bombear agua del río hacia los terrenos agrícolas más elevados. Estos molinos levantan unos 10 a 12 l/s de agua con un promedio de 7 horas diarias de viento entre 6 y 10 m/s. La tecnología tiene unos 60 años. El costo de un molino es de unos US\$ 1,500, incluido el pozo.

En Pachacútec, un pequeño empresario arequipeño inició hace 25 años la fabricación y comercialización de aerobombas metálicas para irrigar huertos familiares. Desde 1970 hasta 1995 se han fabricado 1,500 aerobombas para Arequipa, Cusco, Puno, Ica y Lima. En Pachacútec, en épocas de viento, se puede extraer al día hasta 50 cilindros de agua de 200 l cada uno.

Los talleristas de Arequipa producen molinos de tres tamaños: con 2.8 m de rotor (US\$ 1,500), con 3.5 m de rotor (US\$ 2,500) y con 4.5 m de rotor (US\$ 3,500). Todos estos precios son para profundidades de acuífero de 6 m. Estos precios son sólo para materiales y mano de obra del molino.

En mayo de 1990 se inició un proyecto para instalar aerobombas argentinas marca FIASA, para riego. El proyecto "Apoyo a la Producción Alimentaria de la Provincia de Pisco" fue financiado por el Fondo de Cooperación Técnica Argentina y por el Gobierno Peruano. Estuvo a cargo de la ONG CAESCOOP y duró 10 meses. Se iban a instalar nueve molinos para beneficiar a veinte familias de agricultores, para irrigar 100 hectáreas de terreno agrícola. Los equipos consisten en la aerobomba (con rotor de 3 m de diámetro y 20 aspas), una torre de 9 m, u reservorio de 30 m³, un pozo de 8 m de profundidad y un sistema de riego por goteo.

Hay pocas experiencias con *aerogeneradores* en el Perú. En 1983, ELECTROPERU y la cooperación técnica italiana, desarrollaron un proyecto piloto de aerogeneración en Yacila (Piura) en una caleta de pescadores artesanales de 80 familias. Se trataba de 3 unidades MP-5 Riva Calzoni bipala y eje horizontal, con diámetro de rotor de 5.3 m, potencia máxima de 3.6 kW a una velocidad de viento de 12 m/s. El sistema de acumulación estaba compuesto por 54 baterías en serie a 108 VCC de salida y 1,500 Ah. Por medio de un inversor de 10 kW se transformaba la tensión a 220 VCA

En una segunda etapa, en julio de 1988, se instalaron tres aerogeneradores ISEA de 10 kW para suministro público, con un banco de baterías de 630 Ah, dos inversores de 35 kW c/u, un cargador de baterías de 35 kW y un tablero de distribución de 70 kW.

Sin embargo, la experiencia más destacable es la de los aerogeneradores WAIRA, fabricados en el país, con tecnología europea. Entre 1989 y 1996 se vendieron 28 de estos aerogeneradores, de entre 500 y 1,200 W. Más de la mitad de ellos, no están operativos en la actualidad. Son principalmente utilizados en pequeñas empresas productivas o de servicios, para iluminación, radio transmisión, activación de motores, iluminación de ambientes, etc.

Sus características técnicas son: rotor de fibra de vidrio de 3 m de diámetro. Con frecuencia nominal de giro de 300 r.p.m. El generador es un alternador de camión. Tiene torre metálica de 6.3 m de altura. La velocidad de viento mínima para su funcionamiento es de 3.5 m/s. La tabla 5.1 muestra los lugares donde han sido instalados los aerogeneradores WAIRA.

Tabla 5.1: Localización de los aerogeneradores WAIRA

	HA DE ENTA	UBICACIÓN	POTENCIA (W)
Dic	1989	Fundo San Felipe, Pisco	500
Dic	1989	Avícola Virú, Trujillo	500
Feb	1990	Sr. Ludeke, Manchay	500
Jun	1990	Sr. Pinasco, Chaclacayo	500
Jul	1990	Barranca	500
Ago	1990	Villacurí, Ica	500
Nov	1990	Punta Sal, Tumbes	600
Feb	1991	Hotel Turistas, Sta. Rosa de Quives	2×600
May	1992	Laguna Grande, Paracas	1,200
Oct	1992	Fundo La Arboleda, Trujillo	600
Dic	1992	Colegio Fé y Alegría, Zapallal	750
Ene	1993	Tierra Sur, Pisco	600
Feb	1993	Lagunillas, Paracas	1,200
Abr	1993	Agropecuaria Buena Vista, Lurín	750
Jul	1993	Fondo Canadiense, Ilo	1,200
Mar	1994	Sr. Néstor Jesusi, Putinza, Yauyos	750
Abr	1994	Sr. Jaime Remón, Piura	2×750
May	1994	Asoc. Enlace Solidario, Zapallal	750
Jun	1994	Com. Quiulacocha, Cerro de Pasco	1,000
Mar	1995	Sr. Iago Masías, Pachacamac	750
Abr	1995	Proyecto MEM-UNI, Antioquía, Huarochirí	1,200
Abr	1995	Proyecto MEM-UNI, Cerro de Pasco	1,200
Abr	1995	Proyecto MEM-UNI, Ayacucho	1,200
Abr	1995	Proyecto MEM-UNI, Cusco	1,200
Set	1995	Min. de Transportes, Pasamayo	

#### 5.1.1 Sistema modular de uso comunal: Experiencia de Antioquía – Huarochirí, Lima

Proyecto piloto: Utilización de energías renovables en poblaciones aisladas

Entidad ejecutora: Grupo de Apoyo al Sector Rural – Universidad Católica del Perú

Descripción: Comunidad  $\rightarrow$  Antioquía

Distrito → Huarochirí

Provincia  $\rightarrow$  Lima
Departamento  $\rightarrow$  Lima
Latitud  $\rightarrow$  12.00°

Datos geográficos: Latitud  $\rightarrow$  12.00°

Longitud  $\rightarrow$  76.30° Altura (msnm) $\rightarrow$  1,200

Promedio diario de insolación  $\rightarrow$  2.5 – 3 kWh/m<sup>2</sup>.día x 4 horas

Velocidad del viento  $\rightarrow$  5.5 – 6 m/s

Beneficiario: Centro de salud

Datos del equipo: Generador eólico → Marca WAIRA, modelo 3GL2 de 1.2 kW de

potencia máxima a 10 m/s a 24 V CC, tripala con timón pivotante Banco de baterías → 4 baterías de ciclo profundo AC DELCO 105 Ah

a 12 V CC

Inversor → DEC Electronic, fabricación nacional automático, de 1 kW

de 24 V CC/220 V CA

Cargas → Televisor color de 21" con control remoto, VH\$ programable de 4 cabezales, TVRO antena parabólica de 3.10 m de diámetro, equipo receptor de 24 canales, 100 W, iluminación interior (8 lámparas ahorradoras de 9 W), iluminación exterior (1 fluorescente recto de 20

W).

#### Ubicación de equipos en Centro de salud:

Antena parabólica: Patio aledaño al centro de salud, en donde el viento no haga vibrar el rotor

y se pueda recibir la señal

Ant. aérea de radio: Cerca de la antena parabólica

Radio transmisor: Auditorio del centro, hay comunicación con el centro de salud de la

comunidad de Langa a 2 horas de camino. Falta comunicación con Lima

TV, VHS, Decodific.: Auditorio. Diariamente acuden 40 personas entre las 8 y 10 p.m. a ver las

noticias; tres días a la semana acuden niños; fin de semana acuden a ver deportes o noticieros. Videos educativos se imparten un día a la semana

93

entre 3 y 5 p.m.

Focos ahorradores: 1 en comedor, 1 en pasaje, 1 en auditorio, 1 en baño de pacientes y 4 en

consultorios

#### 5.1.2 Sistema modular de uso comunal: Experiencia de Racracancha – Cerro de Pasco

Proyecto piloto:

Utilización de energías renovables en poblaciones aisladas

Entidad ejecutora:

Centro de Energías Renovables - Universidad Nacional de Ingeniería

Descripción:

 $egin{array}{lll} {\sf Comunidad} & \to & {\sf Racracancha} \\ {\sf Distrito} & \to & {\sf Tinyahuarco} \\ {\sf Provincia} & \to & {\sf Cerro} \ {\sf de} \ {\sf Pasco} \\ \end{array}$ 

Departamento  $\rightarrow$  Pasco Altura (msnm)  $\rightarrow$  4,380

Datos meteorolog.: C

Clima seco, muchas lluvias en verano. Algunas veces suele nevar.

Temperatura entre 8 y 15°C

Demanda:

625 kWh/año promedio por poblador

Beneficiario:

Local comunal exclusivo para el uso de equipos

Datos del equipo:

Generador eólico → Marca WAIRA, modelo 3GL2 de 1.2 kW de potencia máxima a 10 m/s a 24 V CC, tripala con timón pivotante Banco de baterías → 4 baterías de ciclo profundo AC DELCO 105 Ah

a 12 V CC

Inversor → DEC Electronic de fabricación nacional, automático, de 1 kW

de 24 V CC/220 V CA

Cargas → Televisor color de 21" con control remoto, VHS programable de 4 cabezales, TVRO antena parabólica de 3.10 m de diámetro, equipo receptor de 24 canales, 100 W, iluminación interior (8 lámparas ahorradoras de 9 W), iluminación exterior (1 fluorescente recto de 20

W).

#### 5.2 Potencial de aplicación de la energía eólica en el Perú

El bombeo eólico se puede aplicar en todas las zonas costeras, altiplánicas ventosas y con escasez de aguas superficiales para riego y consumo humano y del ganado, y en donde estén bien estudiados los recursos (eólico y acuífero) a utilizarse. Se deberían potenciar proyectos en las zonas costeras de Piura, Lambayeque, La Libertad, Ica y Arequipa.

En cuanto a la aerogeneración de pequeña potencia (entre 50 W y 2 kW), se podrían aprovechar las zonas ventosas costeras y altiplánicas, donde la red interconectada eléctrica no llega y hay potencial de uso industrial, para iluminación, telecomunicaciones, motores, radio, TV, electrodomésticos y servicios de carga de batería

#### 5.3 Principales proveedores de equipos de energía eólica en el Perú

#### GRUPO DE APOYO AL SECTOR RURAL (GRUPO-PUCP)

Av. Universitaria Cdra. 18 - San Miguel

Tel: 460-2870, Anexo 285

#### PROYECTOS WAIRA S.R.L.

Av. Venezuela 2305

Tel: 423-4567

#### **CORTED Ingenieros S.R.L.**

Av. Guzmán Blanco 240 - Of. 1002 A - Lima 1

Tel: 433-3245

#### SERVICIOS ENERGÉTICOS Y CONSULTORÍA S. R. L.

Jr. Loreto 246 - Of. 205 - Pueblo Libre

Tel: 463-6941

#### SISTELEC CONTROL S.A.

Calle Redón 382 - Lima 41

Tel: 435-7437, 437-7407

#### MOLINOS DE VIENTO PACHACUTEC

Urb. Semi Rural Pachacutec - Calle Moquegua s/n - Arequipa

Tel: 054-222 617

#### ENERGÍAS ALTERNATIVAS DE R2V

Tel: 446-6395



#### **BIBLIOGRAFIA**

#### Capítulo 1:

- [1] Gipe, P. Wind Power for Home and Business, Renewable Energies for the 1990's and Beyond, Chelsea Green Vermont, 1993.
- [2] Fraenkel, P., Hulscher, W., *The Power Guide*, IT Publications, 1994.
- [3] Barlow, R., et al, Solar Pumping, An Introduction and Update on the Technology, Performance, Costs and Economics, World Bank Technical Paper 168.
- [4] Groen, R., Hulscher, W.S., *Rural Electrification, a review of basic concepts,* Universidad de Twente, 1991.
- [5] CENERGIA/TOOL Consult, Electrificación de la localidad de Laguna Grande con energía eólica, 1997.

#### Capítulo 2:

- [1] WMO, Meteorological Aspects of the Utilization of Wind as an Energy Source, Documento Técnico N° 175, publicación N° 575, Génova, 1981,\.
- [2] WMO, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 5a edición WMO, N° 8, Génova, 1983.
- [3] Gipe, P., Wind Power for Home & Business, Renewable Energy for the 1990's and Beyond, Chelsea Green, 1993
- [4] Wieringa, J., Rijkoort, P.J., Wind Climate of the Netherlands, Staatuitgeverij, 1983.

#### Capítulo 3:

- [1] Barlow, R., Mc. Nelis, B., Derrick, A., Solar Pumping, An Introduction and Update on the Technology, Performance, Costs and Economics, Documento Técnico del Banco Mundial N° 168, ITDG 1993, ISBN 0-8213-2101-3.
- [2] Gipe, P., Wind Power for Home & Business, Renewable Energy for the 1990's and Beyond
- [3] Lysen, E.H., *Introduction to Wind Energy*, CWD 82-1. Mayo 1983.
- [4] Roberts, S., Solar Electricity, A Practical Guide to Designing and Installing

Photovoltaic Systems, Prentice Hall 1991, ISBN 0-13-826314-0.

[5] WMO, Meteorological Aspects of the Utilization of Wind as an Energy Source, Nota técnica del WMO No. 175, WMO No. 575, Génova, 1981.

#### Capítulo 4:

- [1] Roberts, S., Solar Electricity, a Practical Guide to designing and Installing Small Photovoltaic Systems, Prentice Hall, 1991.
- [2] Gipe, P., Wind Power for Home & Business, Renewable Energy for the 1990s and Beyond, Chelsea Green Vermont, 1993.

#### Capítulo 5

- [1] Marticorena, B., El diagnóstico de las energías solar y eólica en el Perú, Centro de Energías Renovables UNI, 1996.
- [2] Baldo, G., Estado Actual de las Fuentes de Energía Nuevas y Renovables en el Grupo Andino, JUNAC, 1989.
- [3] Hadzich, M., Sistema modular de uso comunal: Experiencia de Antioquía Huarochirí, Grupo de Apoyo al Sector Rural PUCP, 1996
- [4] Espinoza, R., Sistema modular de uso comunal: Experiencia de Racracancha Cerro de Pasco, Centro de Energías Renovables UNI, 1996

# ANEXO A

## ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA ENERGÍA EÓLICA

#### ASPECTOS ECONÓMICOS DE LA ENERGÍA EÓLICA

#### A.1 Costos de la generación de electricidad

Si bien el viento no cuesta, la turbina de viento sí. El costo anual es determinado, en gran medida, por la inversión inicial, el tiempo de vida estimado y las tasas de interés, ya que los costos operacionales de la turbina son bajos.

Los costos capitales corresponden a la compra de las turbinas de viento, transporte al lugar escogido, cimentación y otras obras civiles, y el almacenamiento (banco de batería, de ser necesario). Además, se debe cubrir el costo de la instalación. Los costos periódicos de una turbina de viento equivalen a los costos operacionales y los de mantenimiento.

Es imposible conocer los costos exactos de operación y de mantenimiento, por lo general se estima que éstos equivalen del 1 al 3% del costo anual de la máquina (aunque pueden ser considerablemente más altos para los lugares remotos).

#### A.2 Cálculo de los costos de inversión para aerogeneradores

En este capítulo, se darán un promedio de cifras que podrán ser utilizadas para calcular los costos de un sistema en el análisis económico. Estas cifras sólo darán un indicador. Al comprar un sistema, el costo exacto siempre deberá ser evaluado pidiendo una opinión a varios proveedores.

Los precios que se detallan en esta sección son del año 1995, y han sido obtenidos de publicaciones y verificados con información de los fabricantes.

#### A.2.1 Aerogeneradores pequeños

La tabla 1 presenta un gráfico de los costos de cuatro tipos de aerogeneradores pequeños (hasta 7 metros de diámetro del rotor). El tiempo de vida de un aerogenerador pequeño es de 10 a 15 años. Estos precios incluyen el sistema eléctrico y la instalación.

Tabla A.1: Costos de aerogeneradores pequeños

MARCA		WAIRA (Peruano)	BERGEY 1 (Americano)	BERGEY 2 (Americano)	WHISPER (Americano)
Diámetro	(m)	3	5	7	2.7
Costo llave en mano	(US\$)	4,000	14,500	50,700	6,500
Potencia	(kW)	1.2	1.5	10	1
Energía mensual *	KWh/mes	198	216	2,060	273

(\*) La energía mensual está calculada a una altura de 19.2 m

Fuente: CENERGIA

#### A.2.2 Aerogeneradores grandes (100 kW a más)

Una cifra común para aerogeneradores grandes, es de US\$ 1,250 por kW del generador. Estos son costos para un proyecto completo. Naturalmente, esta cifra es sólo un indicador. Específicamente, si se compran varias turbinas, el precio es tan alto que siempre estará abierta la posibilidad para una negociación. El costo de la inversión dependerá también de la forma de financiamiento y (posiblemente) de los subsidios del gobierno y créditos en los impuestos. El tiempo de vida de un aerogenerador grande es de 15 a 20 años.

#### A.2.3 Baterías

Gipe [1] da la cifra de US\$ 1 por Ah, lo que equivale a US\$ 83 por kWh (para baterías de 12V). Esto parece ser demasiado optimista, ya que la información de los proveedores indica un precio de 100 – 110 por kWh. La cifra de US\$ 100 por kWh es probablemente un buen promedio, lo que significa un precio de:

• para baterías de 12V : US\$ 1.2 por Ah

para baterías de 24V : US\$ 2.4 por Ah

#### A.2.4 Componentes electrónicos

**Controlador:** El precio de los controladores depende de su capacidad de corriente. Existen de 4 a 24 amp, costando entre 40 y 120 US\$.

Inversor: El precio de un inversor depende de su potencia. Puede calcularse en US\$ 700

por kW. Los precios para los dispositivos varían mucho y deberían obtenerse de

los proveedores.

#### A.2.5 Artefactos

Los precios de los artefactos pueden variar mucho, por lo que deberían obtenerse de los proveedores.

#### A.3 Costos de la electricidad

En este capítulo se harán algunos cálculos de los costos de la electricidad. Las cifras dadas son indicativas, pues los cálculos exactos de los costos deben hacerse para cada proyecto de electrificación, incluyendo los costos de instalación, mantenimiento, transporte, guardianía, etc. Los precios hacen referencia a los costos de la obtención de electricidad para viviendas, es decir:

- Para aerogeneradores: aerogeneradores y baterías
- Para equipos diesel: motor diesel y generador.

Todos los cálculos de precios se realizan utilizando el método del tiempo de recuperación de la inversión y con la renta vitalicia (método del descuento). El descuento se hace con  $\mathbf{d} = 10\%$  y la inflación  $\mathbf{i} = \text{cero}$ .

ADVERTENCIA: Los precios calculados anteriormente están basados, en gran medida, en suposiciones y no tienen valor en absoluto. Para evitar cálculos complicados sólo se incluyen los costos elevados y se asume un suministro promedio de viento.

#### **Ejercicio A.1:**

¿Cree usted que generar electricidad con energía eólica en la costa peruana resulta más barato que hacerlo con un generador diesel?

- a) La generación eólica es mucho más barata
- b) La generación eólica y con diesel cuestan aproximadamente lo mismo
- c) La generación eólica es más cara.

#### A.3.1 Aerogeneradores

#### Aerogeneradores pequeños

El costo de la electricidad generada por aerogeneradores depende del tamaño de la turbina (aerogeneradores grandes son más baratos por unidad de área barrida) y del régimen de viento (más viento provee más energía con la misma inversión para la turbina).

Como ejemplo, consideremos el aerogenerador Bergey Excel, que cuesta US\$ 20,000 y tiene un rotor de 7 m de diámetro. Cálculos exactos dan el siguiente producto anual de salida:

Tabla A.2: Salida anual y precio de la electricidad para un aerogenerador pequeño (Bergey Excel)

Velocidad del viento a altura del eje del rotor (m/s)		estimada Wh)	Precio electric (US\$/k	idad
(a nivel del mar, 15 °C)	Año	Día	Recuperación	Descuento
4	7600	21	0.53	0.86
5	14300	39	0.46	
6	21700	59	0.44	

Además, se requieren baterías para aerogeneradores. Asuma que es necesario un almacenamiento de 5 días; esto significa por ejemplo que con 4 m/s:  $5 \times 21 = 105$  kWh. Con 70% de descarga, se deben adquirir baterías de 105/0.70 = 150 kWh. Con US\$ 100 por kWh, esto cuesta US\$ 15,000. Asuma que el tiempo de vida de la batería es de 5 años (1,800 ciclos), entonces deberán comprarse 4 juegos de baterías en 20 años.

La inversión total será: US\$  $20,000 + 4 \times 15,000 = US$ 80,000$ .

Por este dinero uno obtiene  $20 \times 7,600 = 152,000$  kWh, resultando un precio de US\$ 0.53 por kWh. En la tabla 1.4 se puede observar que el precio no baja significativamente con más viento. Esto se debe a que más energía significa también más baterías.

#### A.3.2 Equipos diesel

Un problema al comparar los equipos diesel con los equipos solares y eólicos es que los diesel tienen un tamaño mínimo. Sin embargo, ese tamaño proporciona una gran cantidad de energía. Por lo tanto, si no hay suficientes usuarios, los diesel muy bien podrían ser la opción más económica. Un equipo diesel se considera cuando se desea obtener una potencia por debajo de 20 kW, que es la máxima potencia eléctrica de salida.

#### Energía

Se debe esperar que un diesel opere gran parte del tiempo con cargas parciales (el motor es muy grande, o el consumo de electricidad muy pequeño). Asumamos una carga promedio de 70%. Con 6 horas de uso al día, la energía diaria de salida es de  $0.70 \times 6 \times 20 = 84$  kWh. En 20 años, la salida es de  $20 \times 365 \times 84 = 613,200$  kWh.

¿Qué cantidad de combustible se necesitaría para producir 1 kWh de electricidad? El contenido de energía del diesel es aproximadamente 10 kWh/litro. Con una eficiencia máxima del 50%, uno necesita 0.2 litros. Es más realista pensar en un 25% de eficiencia (sobre todo porque el motor diesel no operará a carga completa), lo que nos da 0.4 litros por cada kWh. El consumo diario de combustible es de  $84 \times 0.4 = 33.6 \text{ litros}$ .

#### Costos (tiempo de recuperación de la inversión)

A US\$ 100 por kWh, el costo de inversión de un juego de 20 kW es de US\$ 20,000. El tiempo de vida de un equipo diesel es de 15,000 horas; por lo tanto, con 6 horas diarias de uso, la vida del diesel es de 7 años, por lo que se requieren 3 equipos en 20 años. En este mismo periodo, se necesitan 245,280 litros de combustible. A US\$ 0.50 por litro, esto significa una inversión de US\$ 122,600.

La inversión total se convierte en  $3 \times 20,000 + 122,600 = US$ \$ 182,600, y el precio de la electricidad sería de US\$ 182,600/613,200 = US\$ 0.30 por kWh.

#### Costo (10% de descuento)

Los equipos diesel deben comprarse en el año cero, año 7 y año 14. La inversión descontada sería de:

$$I = 20,000 + 0.51 \times 20,000 + 0.26 \times 20,000 = US$$
\$ 35,400

El costo del combustible es el mismo cada año, por lo tanto el factor de descuento acumulado que puede usarse sería D = 8.51. Esto nos da una inversión en combustible de  $8.51/20 \times 613,200 = 260,900$  kWh. Entonces, el precio de la electricidad sería de: (35,400 + 52,200)/260,900 = US\$ 0.34

#### Observaciones

El precio de la electricidad casi no cambia con los descuentos, porque tanto el costo como la electricidad se reparten a lo largo de un período de 20 años. Un equipo de 20 kW es bastante grande. Asumamos que una familia utilice 1 kWh por día, entonces 84 familias podrían beneficiarse.

#### Ejercicio A.2:

Compare los precios incluidos en este manual con los del mercado peruano actual. ¿Existen diferencias considerables? De ser así, explique por qué.

## ANEXO B

ESCALA DE BEAUFORT

#### ESCALA DE BEAUFORT

N°	VELOCIDAD		AD	DESCRIPCIÓN	PRESIÓN MÁXIMA (TEÓRICA) SOBRE SUPERFICIE FRONTAL N/M²
0	0-1	0-1	0-2	Calma	1
1	1-3	1-2	2-6	Brisa muy ligera	3
2	4-6	2-3	7-11	Brisa ligera	12
3	7-10	4-5	13-19	Pequeña brisa	33
4	11-16	6-8	20-30	Linda brisa	85
5	17-21	9-11	31-39	Buena brisa	146
6	22-27	11-14	41-50	Viento fresco	241
7	28-33	14-17	52-61	Gran fresco	360
8	34-40	17-21	63-74	Golpe de viento	529
9	41-47	21-24	76-87	Fuerte golpe de viento	731
10	48-55	25-28	89-102	Tempestad	1001
11	56-63	29-32	104-117	Tempestad violenta	1313
12	64-71	33-37	119-131	Huracán	1668
13	72-80	37-41	133-148	_	2117
14	81-89	42-46	150-165	_	2620
15	90-99	46-51	167-183	_	3242
16	100-108	51-56	185-200	_	3859
17	109-118	56-61	202-219	Ciclón	4606

## CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA LA ESCALA DE BEAUFORT

GRADOS BEAUFORT	EN MAR	EN TIERRA  El humo se eleva verticalmente	
0	Mar en calma.		
1	Formación de ondas con aspecto de escamas, pero sin cresta de espuma.	El viento hace inclinarse al humo, pero no hace girar a las veletas.	
2	Onditas cortas. Las crestas tienen aspecto vidrioso, pero no rompen.	Las hojas tiemblan. Se aprecia el soplo del viento en el rostro.	
3	Olitas más grandes. Las crestas comienzan a romper. Espuma de aspecto vidrioso con manchas dispersas.	Las hojas y ramas pequeñas se agitan permanentemente.	
4	Las olas cortas se alargan. La espuma se hace más densa y abundante.	El viento levanta polvo y hojas. Las ramas se agitan.	
5	Olas moderadas con una forma más pronunciada. Numerosos ovillos de espuma.		
6	Comienzan a formarse grandes olas. Crestas de espuma blanca por todas partes. Brumas.	Las grandes ramas se agitan. Los cables vibran. Se hace difícil servirse de un paraguas.	
7	Mar gruesa. El viento levanta la espuma, difuminándola.	Los árboles se mueven. Es desagradable andar con el viento de frente.	
8	Grandes olas, altas y extensas. Las crestas se pulverizan y la espuma se vuela	Las ramitas se parten. Se hace difícil caminar.	
9	Las olas altas se rompen. Densas huellas de espuma. Las brumas reducen la visibilidad.	Las ramas de tamaño medio se rompen.	
10	Las grandes olas se rompen de forma violenta. La superficie del agua está blanca. Visibilidad escasa.	Los árboles son arrancados y los tejados se deterioran.	

# ANEXO C DENSIDAD DEL AIRE

#### DENSIDAD DEL AIRE

La densidad del aire está dada por:

$$\rho = 3.4839 \times 10^{-3} \text{ P/T} \tag{C.1}$$

Donde:

P presión [Pa] =  $[N/m^2]$ 

presión atmosférica normal a nivel del mar = 101,325 Pa

T temperatura [°K]

ρ densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]

Si usamos unidades más comunes esto se transforma en:

$$\rho = 348.39 \frac{p}{t + 273.16} \tag{C.2}$$

Donde:

p = presión [bar]

presión atmosférica normal a nivel del mar = 1.01333 bar

t = temperatura [°C]

#### Conversión para otras unidades de presión

1 atm (atmósfera) = 101,325 Pa = 1.01325 bar

1 cm Hg (centímetro de mercurio) = 1,333.2 Pa = 0.01333 bar

1 mbar (milibar) = 100 Pa = 0.001 bar

1 bar = 100,000 Pa

Tabla C.1: Influencia de la temperatura en la densidad del aire (a nivel del mar, presión 1,013 mbar)

TEMPERATURA [°C]	DENSIDAD DEL AIRE [kg/m³]	CONTENIDO DE ENERGÍA (E=100 a 15°C] [%]
-20	1.394	114
-10	1.341	109
0	1.292	105
10	1.247	102
15	1.225	100
20	1.204	98
30	1.164	95
40	1.127	92

La densidad del aire varía de acuerdo a la altura. A mayor altura, menor será la presión. Este efecto negativo en la densidad del aire es compensado parcialmente por una temperatura más baja. Vea la Tabla C.2.

Tabla C.2 Influencia de la altitud en la densidad del aire (presión y temperatura calculadas en condiciones atmosféricas estándar)

Altitud	Temperatura Promedio [°C]	Presión Promedio [mbar]	Densidad del aire [kg/m³]	Contenido de energía [%]
0 (nivel del mar)	15	1,013	1.225	100
1,000	8.5	899	1.112	91
2,000	2	795	1.006	82
3,000	-4,5	701	0.909	74
4,000	-11	616	0.819	67

Impreso en los talleres de

GOVI - 4 E.I.R.L R.U.C. 11080871 Av. Petit Thouars 1887 - Lince Telefax: 265-6273 Lima - Perú