

---

# *Manual para ayudar la comprensión del diseño de microaerogeneradores*

---

## **Agradecimientos**

---

La redacción de este manual no habría sido posible sin el apoyo de Gerardo de Lucas Cabañas de la empresa WAIRA; se lo agradece mucho por las numerosas informaciones que me dio y por su disponibilidad en contestar preguntas.

Muchas gracias también a la ONG Soluciones Prácticas, y en particular a Robert Cotrina, Gilberto Villanueva y Fernando Acosta por las informaciones que brindaron y la interesante visita del proyecto de microaerogeneradores en El Alumbre, Cajamarca.

Por fin se lo agradece mucho a mis colegas de Microsol, por haber creado un ambiente de trabajo muy simpático.

Astrid Forget

16 de junio 2011, Lima

## Contenido

---

Agradecimientos .....	1
Contenido.....	2
Lista de ilustraciones.....	5
Lista de tablas .....	6
Introducción.....	7
1. Principios básicos de la tecnología .....	8
1.1. Potencia de entrada .....	8
1.2. Ley de Betz.....	9
1.3. Potencia eléctrica generada .....	9
1.3.1. Definición.....	9
1.3.2. Distribución de las velocidades del viento .....	10
1.3.3. Densidad de potencia.....	11
1.3.4. Curva de potencia.....	11
1.4. Estándares de aerogeneradores.....	12
1.5. Resumen.....	13
2. Sistema de microaerogeneración.....	14
2.1. Componentes .....	14
2.1.1. El microaerogenerador.....	14
2.1.1.1. Hélice o conjunto rotor.....	15
2.1.1.1.1. Dirección y orientación del eje del rotor .....	15
2.1.1.1.2. Número de palas.....	16
2.1.1.1.3. Forma y material de las palas .....	17
2.1.1.2. Multiplicadora.....	18
2.1.1.3. Máquina eléctrica o generador.....	18
2.1.1.3.1. Diferentes tipos de generadores eléctricos utilizados para MCAs .....	18
2.1.1.3.2. Detalles sobre los generadores de imanes permanentes.....	19
2.1.1.4. Bastidor o tornamesa o chasis.....	21
2.1.1.5. Buje o bocamaza .....	21
2.1.1.6. Sistema de orientación .....	21
2.1.1.7. Sistema de control: regulación y frenado.....	22
2.1.1.8. Cono o tapadera .....	23
2.1.1.9. Torre soporte .....	24
2.1.1.10. Resumen .....	24
2.1.2. Sistema de control, almacenamiento y distribución de la electricidad .....	25
2.1.2.1. Diodos rectificadores .....	25
2.1.2.2. Regulador (o controlador) eólico.....	26

2.1.2.2.1.	Regulador de carga simple con diodos rectificadores y resistencia de disipación	26
2.1.2.2.2.	Regulador eólico integrando la función de rectificación de la señal.....	28
2.1.2.3.	Batería.....	29
2.1.2.3.1.	Características y tipos de baterías .....	29
2.1.2.3.2.	Influencia de la temperatura .....	31
2.1.2.3.3.	Marcas y precios de baterías .....	31
2.1.2.4.	Inversor CC/CA.....	32
2.1.2.5.	Tablero de control y accesorios eléctricos.....	34
2.1.2.6.	Cargas.....	35
2.1.2.7.	Resumen .....	36
2.2.	Definición de características.....	37
2.2.1.	Problemática (9) .....	37
2.2.2.	Medidas físicas .....	37
2.2.2.1.	Velocidad del viento .....	38
2.2.2.2.	Rosa de viento.....	39
2.2.3.	Colocación del aerogenerador .....	40
2.2.4.	Estimación de la energía generada .....	41
2.2.5.	Rotor.....	42
2.2.6.	Estimación de cargas .....	42
2.2.7.	Dimensionamiento del generador.....	44
2.2.8.	Cálculo del tamaño de la batería.....	44
2.2.9.	Selección del inversor (en caso sea necesario) .....	45
2.2.10.	Caso de un MCA multifamiliar.....	45
2.2.11.	Resumen y ejemplos de modelos.....	46
2.3.	Normas .....	47
3.	Instalación .....	48
3.1.	Torre soporte.....	48
3.2.	Conexión eléctrica .....	49
3.3.	Participación de los usuarios .....	50
4.	Operación, mantenimiento y reemplazo .....	51
4.1.	Operación .....	51
4.2.	Mantenimiento.....	51
4.2.1.	Mantenimiento del aerogenerador.....	51
4.2.2.	Mantenimiento del regulador de carga .....	52
4.2.3.	Mantenimiento de la batería.....	52
4.2.4.	Mantenimiento del inversor.....	54
4.2.5.	Mantenimiento de equipos consumidores y cableados .....	54

4.2.6.    Otras recomendaciones (30) .....	55
4.3.    Reemplazo .....	55
Conclusión.....	57
Bibliografía .....	58
A.    Mapa eólico del Perú.....	60
B.    Reacciones químicas en una batería de plomo-ácido .....	62
C.    Efecto Peukert (18).....	63
D.    Principios básicos de electricidad.....	65
D.1.    Cargas eléctricas.....	65
D.2.    Corriente eléctrica .....	65
D.2.1.    Definiciones .....	65
D.2.2.    Analogía hidráulica .....	67
D.3.    Circuitos eléctricos .....	67
D.3.1.    Circuito en serie.....	67
D.3.2.    Circuito en paralelo .....	68
D.3.3.    Ley de Ohm.....	68
D.4.    Potencia y energía eléctricas.....	68

## Lista de ilustraciones

---

Ilustración 1.a: Superficie barrida por las palas.....	8
Ilustración 1.b: Desviación del viento por un aerogenerador. En el caso ideal, $v_2 = v_{13}$ (2) .....	9
Ilustración 1.c: Descripción de las variaciones del viento: distribución de Weibull. Abscisa: velocidad del viento; ordenada: probabilidad de ocurrencia. (2).....	10
Ilustración 1.d: Potencia del viento. Abscisa: velocidad del viento; ordenada: potencia eólica por $m^2$ de flujo del viento. (2).....	11
Ilustración 1.e: Curva de potencia de un típico aerogenerador danés de 600 kW (2) .....	12
Ilustración 1.f: Curva de potencia de IT-PE-100 (7) .....	12
Ilustración 2.a: Componentes de un MCA típico (9).....	15
Ilustración 2.b: Rotor a barlovento .....	16
Ilustración 2.c: Rotor a sotavento.....	16
Ilustración 2.d: Aerobomba con turbina lenta.....	16
Ilustración 2.e: Ejemplo de GESIP fabricado artesanalmente (10) .....	19
Ilustración 2.f: Los imanes de los rotores de un GESIP se ubican de tal manera que se atraigan (12) .....	20
Ilustración 2.g: Bobinas para el estátor (12) .....	20
Ilustración 2.h: Generador de imanes permanentes desarrollado por ITDG (9) .....	20
Ilustración 2.i: Prueba del equilibrio del conjunto generador (12) .....	21
Ilustración 2.j: IT-PE-100 con su veleta en cola (8) .....	22
Ilustración 2.k: Cono de protección (resina con fibra de vidrio) (8) .....	24
Ilustración 2.l: Esquema de diodos rectificadores (12).....	26
Ilustración 2.m: Foto de 2 diodos rectificadores (12).....	26
Ilustración 2.n: Tablero de control conllevando el regulador y tablero de control, y resistencia de disipación debajo, en El Alumbre (8).....	27
Ilustración 2.o: Regulador de marca Steca en Amantani, proyecto CER-UNI (15) .....	28
Ilustración 2.p: Regulador con caja de conexiones en el tablero de control, y contador de Ah, en Amantani, proyecto CER-UNI (15).....	28
Ilustración 2.q: Regulador de marca Phocos en Alto Perú, Cajamarca (16) .....	28
Ilustración 2.r: Regulador de marca Steca en Yerba Buena Alta, Cajamarca (17) .....	28
Ilustración 2.s: Batería ETNA en Los Uros, Puno (15) .....	32
Ilustración 2.t: Batería solar Sonnenschein en Alto Perú, Cajamarca (16) .....	32
Ilustración 2.u: Batería estacionar CAPSA en El Alumbre, Cajamarca (8).....	32
Ilustración 2.v: Inversor 12V CC/230V CA de marca Xantrex, potencia 300 W, en El Alumbre .....	33
Ilustración 2.w: Diferentes tipos de ondas. De izquierda a derecha: cuadro, semisinusoide y sinusoide pura. (23).....	34
Ilustración 2.x: Contador de Ah del CER-UNI en la isla de Amantani, Puno (15).....	35
Ilustración 2.y: Típico sistema de pequeña aerogeneración (9) .....	37
Ilustración 2.z: Anemómetro de cazoleta (27).....	39
Ilustración 2.aa: Rosa de viento con representaciones de la frecuencia y de la energía eólica (29) .....	40
Ilustración 2.bb: Evitar las turbulencias generadas por edificios y vegetación (9).....	41
Ilustración 2.cc: Curva típica de la evolución de la potencia necesaria a lo largo del día (9) .....	43
Ilustración 3.a: IT-PE-100 con un tubo galvanizado como torre soporte (8) .....	48
Ilustración 3.b: IT-PE-100 en mayor altura, con una torre más robusta (8) .....	48
Ilustración 3.c: SP-500 con torre más robusta, hecha de varios tubos (8) .....	48
Ilustración 3.d: Disposición de los anclajes, IT-PE-100 (7) .....	49
Ilustración 3.e: Izamiento de una torre sencilla (9) .....	49
Ilustración 3.f: Izamiento de un IT-PE-100 en el Perú mediante postes y cuerdas (9) .....	49
Ilustración 3.g: Conexión de conductores a diodos (7).....	50
Ilustración 4.a: Añadido de agua destilada para mantener el nivel de electrolito (30) .....	53

Ilustración 4.b: Elementos de palas rotas (8) .....	56
Ilustración 4.c: Cono malogrado (8).....	56
Ilustración 4.d: Velea corroda (8) .....	56
Ilustración 4.e: Torre soporte rota (8) .....	56
Ilustración A.a: Viento medio anual a 50 m en el Perú .....	60
Ilustración A.b: Longitud de rugosidad en el Perú.....	61
Ilustración B.a: Flujos de electrones e iones entre los electrodos (31) .....	62
Ilustración C.a: Influencia del coeficiente de Peukert y de la corriente sobre la capacidad de la batería (31) .....	64
Ilustración D.a: Corriente eléctrica, generada por el movimiento de electrones .....	65
Ilustración D.b: Tensión de corriente continua .....	66
Ilustración D.c: Tensión de corriente alterna.....	66
Ilustración D.d: Circuito en serie.....	67
Ilustración D.e: Circuito en paralelo .....	68

## Lista de tablas

---

Tabla 1.a: Clasificación de aerogeneradores en función de su potencia nominal (6) .....	13
Tabla 2.a: Componentes de un sistema de aerogeneración .....	14
Tabla 2.b: Tipología de los aerogeneradores.....	15
Tabla 2.c: Componentes del MCA.....	25
Tabla 2.d: Tipos de baterías .....	31
Tabla 2.e: Ejemplos de marcas de baterías.....	32
Tabla 2.f: Ventajas y desventajas de constar con un inversor .....	33
Tabla 2.g: Cargas .....	36
Tabla 2.h: Componentes del sistema de control, almacenamiento y distribución de electricidad	36
Tabla 2.i: Estimación de producción de energía mensual en kWh para varios tamaños de rotor y varias velocidades de viento (9) .....	41
Tabla 2.j: Cálculo de la energía diaria, mensual, de la carga diaria, de la potencia media. Estimación del pico de potencia. Caso de las cargas en CC. ....	42
Tabla 2.k: Cálculo de la energía diaria, mensual, de la carga diaria, de la potencia media. Estimación del pico de potencia. Caso de las cargas en CA. ....	43
Tabla 2.l: Ejemplos de modelos de MCAs y otros componentes, con costos o precios de venta (9) (10) (11) .....	47
Tabla 3.a: Material para la cimentación de la torre soporte .....	49

## Introducción

---

Con una tasa de electrificación de 78% al nivel nacional, en el Perú quedan 6 millones de personas sin acceso a esta energía, mayormente en zonas rurales de baja densidad de población y de acceso difícil que hace poco rentable la prolongación de la red interconectada nacional hacia ellas. Por tanto la electrificación rural mediante pequeños sistemas autónomos utilizando recursos renovables, como la energía cinética del viento, se ve como un medio de proporcionar a estas personas electricidad, que además de ser limpia por ser producida a partir de fuentes renovables, les permitirá mejorar su nivel de vida con el acceso a una iluminación de calidad, la posibilidad de utilizar otros aparatos eléctricos y la oportunidad de tener más ingresos al utilizar la electricidad a fines productivas.

El presente documento aspira a aclarar conceptos sobre el diseño de microaerogeneradores, que son instalaciones autónomas generando electricidad a partir de la energía cinética del viento. Se destina a personas que quieren difundir esta tecnología vía la implementación de proyectos de pequeños sistemas de aerogeneración en el país o vía el desarrollo de canales de distribución de estos productos. Se proporcionaran herramientas de diseño y de instalación de pequeños aerogeneradores y se mencionaran las tareas a realizar para el buen manejo y el mantenimiento de dichos sistemas.

En este documento se tratará sólo de microaerogeneradores, es decir aerogeneradores de potencia inferior a 1 kW, y superior a 50 W, que pueden ser de uso unifamiliar para las potencias más pequeñas, o comunal o productivos para las más grandes.

Como la mayoría de las energías renovables, la eólica tiene su origen en el sol, entre 1 y 2% de la energía proveniente del sol se convirtiendo en viento. El movimiento del aire se forma por el desigual calentamiento de la superficie terrestre. Tomando en cuenta las áreas con valor ambiental, donde no se pueden instalar parques eólicos, esto supone un potencial de energía eólica que supera con distancia el consumo eléctrico en el mundo, alcanzando 53 TWh/año, cinco veces más el consumo actual. (1)

# 1. Principios básicos de la tecnología

---

Como la mayoría de las energías renovables, la energía eólica tiene su origen en la radiación solar que alcanza el planeta. La desigualdad de calentamiento del aire en diferentes partes de la Tierra (más radiación solar es absorbida en las regiones ecuatoriales que en las polares) genera movimientos de aire en la atmósfera. Con la influencia de la rotación de la Tierra se dan zonas de vientos dominantes. Al nivel local también existe el fenómeno de movimiento de masas de aire de temperaturas diferentes, creando vientos locales.

La generación de electricidad a partir del recurso eólico consiste en transformar la energía cinética del viento en energía mecánica mediante una turbina eólica y por fin en energía eléctrica mediante un generador; el conjunto de los componentes que permiten convertir la energía eólica en electricidad es denominado aerogenerador. Esta tecnología en sí misma es sencilla, pero optimizarla y adaptarla a cada situación requiere esfuerzos.

## 1.1. Potencia de entrada

---

Una turbina eólica recibe una cierta cantidad de aire, la cual tiene una energía cinética que se calcula por la fórmula siguiente:

$$E_{cin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1.1)$$

Donde:  $m$  es la masa de esta cantidad de aire

$v$  es la velocidad de esta cantidad de aire, es decir la velocidad del viento

El volumen de aire cruzando una superficie  $S$  a la velocidad  $v$  en 1 s es:  $V_{aire} = vS$ , y la masa de este volumen es  $\rho vS$ , donde  $\rho$  es la densidad del aire. El valor de  $\rho$  depende de la presión atmosférica, de la temperatura y un poco de la humedad.

$S$  representa la superficie barrida por las palas del aerogenerador:  $S = \pi d^2 / 4$ , donde  $d$  es el diámetro del aerogenerador.

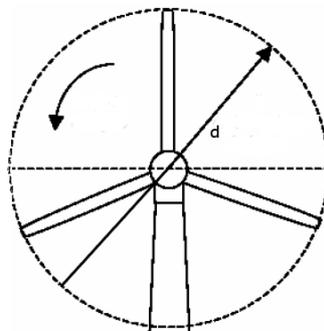


Ilustración 1.a: Superficie barrida por las palas

Reemplazando la expresión de la masa en la ecuación 1.1, viene que la potencia de entrada a la turbina es:

$$P_{cin} = \frac{1}{2} \rho v S \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (1.2)$$

Aplicando esta fórmula, conociendo la densidad del aire, se pueden calcular las potencias de entrada por m<sup>2</sup> de superficie de la hélice para diferentes velocidades. Ver por ejemplo el manual de referencia del documento (2).

## 1.2. Ley de Betz

---

Pero esta potencia nunca se puede recuperar totalmente por la turbina; eso significaría que el flujo de aire se parase al nivel del aerogenerador que no quedase ningún viento más abajo de él.

El físico alemán Albert Betz demostró en el 1920 que sólo puede convertirse menos de  $\frac{16}{27}$  (el 59.3%) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador, cualquier diseño tenga éste. Entonces:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_{cin} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} S v^3 = \frac{8}{27} \rho S v^3 \quad (1.3)$$

Este máximo de  $\frac{16}{27}$  puede ser alcanzado si el aerogenerador disminuye de los  $\frac{2}{3}$  la velocidad del viento, lo cual sería entonces un aerogenerador ideal.

Esto significa que el coeficiente de potencia de las aspas  $C_p$ , que expresa la fracción de energía capturada por el aerogenerador, tiene como máximo teórico un valor de 59.3% (límite de Betz); sin embargo, nunca tenemos un aerogenerador ideal, entonces en general  $C_p$  varía entre 0.2 y 0.4 y ahora puede a veces alcanzar 0.5 (3). Para un aerogenerador dado, este coeficiente varía también según la velocidad del viento (4).



Ilustración 1.b: Desviación del viento por un aerogenerador. En el caso ideal,  $v_2 = \frac{v_1}{3}$  (2)

## 1.3. Potencia eléctrica generada

---

### 1.3.1. Definición

---

Además, la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica ocasiona pérdidas energéticas. Entonces hay también que multiplicar la potencia por los diferentes rendimientos, simbolizados por  $\eta_{elec}$ , que la afectan (rendimiento del generador, coeficiente de transmisión de la multiplicadora si existe).

Al final,

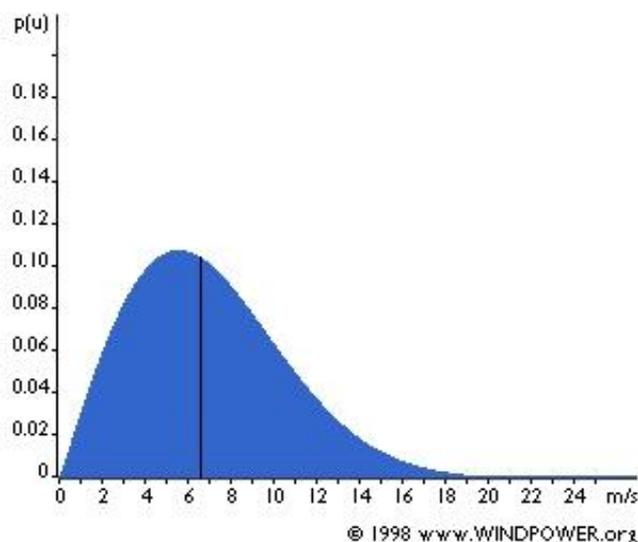
$$P_{elec} = \eta_{elec} \cdot C_p \cdot P_{cin} = \eta_{elec} \cdot C_p \cdot \frac{\rho}{2} S v^3 \quad (1.4)$$

La eficiencia total  $\eta_{elec} \cdot C_p$  tiene típicamente un valor de 0.15 a 0.2 (5).

### 1.3.2. Distribución de las velocidades del viento

Si se quiere conocer la energía producida por el aerogenerador, o la potencia media, se debe tener previamente la distribución de velocidades del viento. De hecho, como estas magnitudes son proporcionales al cubo de la velocidad del viento, los fuertes vientos, mismo con una baja probabilidad de ocurrencia, tendrán una gran influencia sobre el resultado; entonces no basta utilizar como parámetro sólo la velocidad media.

Para hacer la distribución de las velocidades del viento, es necesario hacer medidas sobre el terreno, a lo largo de un año o más. Se suele utilizar para describir la variación del viento en un sitio típico una distribución probabilística de Weibull. Es importante conocer esos datos para poder optimizar el diseño del aerogenerador que se quiere implementar.



**Ilustración 1.c: Descripción de las variaciones del viento: distribución de Weibull. Abscisa: velocidad del viento; ordenada: probabilidad de ocurrencia. (2)**

Función de densidad de probabilidad (FDP) de Weibull:

$$f(x) = k \cdot c^{-k} \cdot x^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k} \quad (1.5)$$

$k$  es el parámetro de forma y  $c$  el parámetro de escala. El parámetro de escala,  $c$ , como la velocidad media, indica como de ventoso es en promedio el emplazamiento, mientras que el parámetro de forma,  $k$ , denota como de puntiaguda es la distribución, es decir, si las velocidades tienden a estar próximas a un cierto valor (más elevado es, más puntiaguda es la distribución).  $k$  varía entre 1.0 y 3.0, y si no se suele otorgar el valor de 2 en ausencia de mucha información. En el

caso de la Ilustración 1.c, la velocidad media del viento es 7 m/s y el parámetro de forma vale 2 (en este caso la distribución se llama distribución de Rayleigh).

### 1.3.3. Densidad de potencia

Ahora, podemos multiplicar la potencia de cada velocidad del viento (cf. ecuación 1.2) por la probabilidad de esta velocidad y resultamos calcular la distribución de energía eólica a diferentes velocidades del viento, es decir la densidad de potencia. (2)

La Ilustración 1.d caracteriza un emplazamiento particular, donde la velocidad media es de 7 m/s y un parámetro de escala de 2, y da la potencia eólica por metro cuadrado del flujo de viento (área bajo la curva gris), la potencia que puede ser aprovechada según la ley de Betz (área bajo la curva azul) y la potencia eléctrica generada (área roja).

Es interesante observar que la mayor parte de la energía disponible se encuentra a velocidades por encima de la velocidad media, lo que confirma lo que ya sabemos, es decir que las velocidades altas tienen un contenido energético mayor, ya que la potencia evoluciona con el tercera potencia de la velocidad del viento.

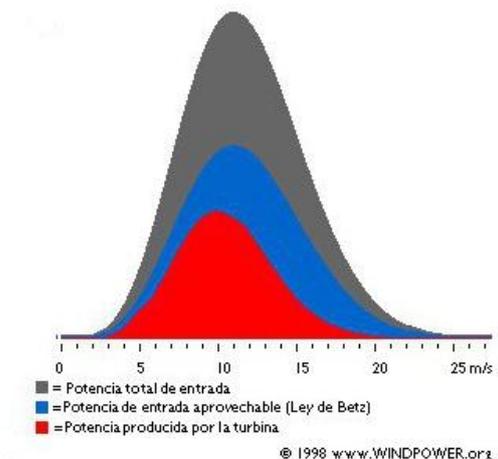
Para conocer el área roja, se puede:

- multiplicar la potencia generada a cada velocidad (cf. ecuación 1.4) por la probabilidad de esta velocidad,
- o utilizar las curvas de potencia proporcionadas por el fabricante del aerogenerador, también multiplicando la potencia indicada a cierta velocidad por la probabilidad de ésta.

### 1.3.4. Curva de potencia

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento. Se obtiene a partir de medidas realizadas en campo con un anemómetro (2).

Una curva de potencia tiene alguna imprecisión, porque la velocidad del viento al momento de la medida fluctúa. Entonces en la práctica se debe tomar un promedio de las diferentes medidas para cada velocidad del viento, y dibujar el gráfico con esos promedios. Como la potencia varía con el cubo de la velocidad del viento, si la velocidad está medida con un error de 3%, la potencia presentará una imprecisión de 9%. En consecuencia, pueden existir errores hasta de  $\pm 10\%$  incluso en curvas certificadas. (2)



**Ilustración 1.d: Potencia del viento. Abscisa: velocidad del viento; ordenada: potencia eólica por  $m^2$  de flujo del viento. (2)**

Para usar la curva, se debe notar las condiciones de temperatura y de presión en las cuales se han realizado las medidas, pues si la utilización difiere de estas condiciones, se deberán adaptar los valores.

Definiciones: (6)

- Velocidad de arranque: velocidad del viento a partir de la cual el aerogenerador empieza a producir electricidad,
- Velocidad nominal: velocidad del viento para la que se alcanza la potencia nominal,
- Velocidad de freno: velocidad del viento a la cual el rotor se detiene gracias a la acción de los sistemas de regulación y control para evitar que se dañe el mismo,
- Velocidad de supervivencia: velocidad del viento por encima de la cual el aerogenerador se puede dañar a pesar de estar parado.

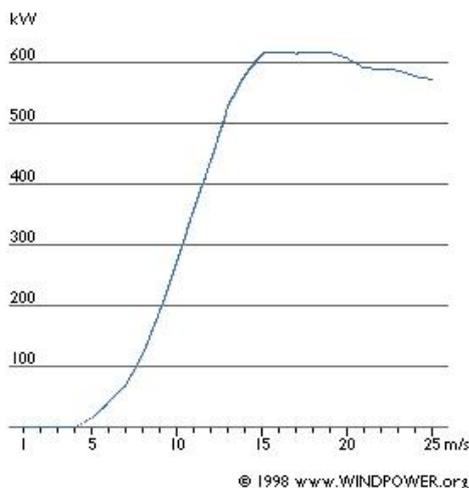


Ilustración 1.e: Curva de potencia de un típico aerogenerador danés de 600 kW (2)

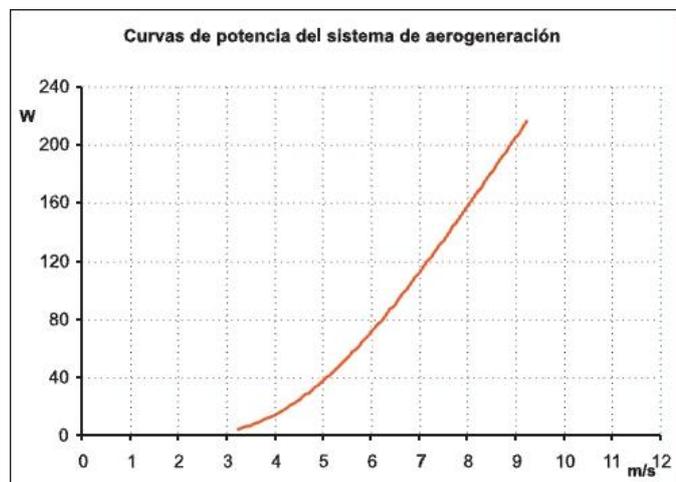


Ilustración 1.f: Curva de potencia de IT-PE-100 (7)

N.B.: la curva de potencia de la Ilustración 1.f tiene una forma similar a la de la Ilustración 1.e, que ponga en evidencia las diferentes velocidades características, pero la gran escala de trazado de la curva no permite mostrar eso.

## 1.4. Estándares de aerogeneradores

Una clasificación común para definir los tipos de aerogeneradores es según la potencia nominal.

Denominación	Potencia nominal (kW)	Utilización
<b>Muy baja</b>	< 1 (microaerogeneradores)	Embarcaciones, sistemas de comunicaciones (TIC <sup>1</sup> ), refugios de montaña, viviendas aisladas, instalaciones comunitarias (escuela, posta de salud), granjas, etc.
	1-10 (miniaerogeneradores)	Granjas, viviendas aisladas, instalaciones comunitarias (escuela, posta de salud), bombeo, etc.

<sup>1</sup> Tecnologías de la información y la comunicación

<b>Baja</b>	10-100	Comunidades, PYMEs (híbridos eólico-diesel), drenaje, tratamientos de aguas, etc.
<b>Media</b>	100-1000	Parques eólicos (terreno complejo)
<b>Alta</b>	1000-10000	Parques eólicos (terreno llano, mar adentro)
<b>Muy alta</b>	> 10000	En fase de investigación y desarrollo

Tabla 1.a: Clasificación de aerogeneradores en función de su potencia nominal (6)

Los aerogeneradores más pequeños (microaerogeneradores o MCA) están utilizados para aplicaciones aisladas con carga de batería, mientras que en los miniaerogeneradores el mercado se está evolucionando hacia potencias de 5 kW con la capacidad de operar tanto aislados como conectados a la red.

La potencia nominal no se debe entender como la potencia de un aerogenerador en cualquier condiciones. De hecho, está definida para una cierta velocidad de viento y bajo condiciones atmosféricas específicas (cf. la definición de la curva de potencia en el §1.3.4); la velocidad de giro del eje del rotor a partir de la cual la potencia se estabiliza está llamada velocidad nominal (en rpm<sup>2</sup>). Por tanto, hablar de la potencia es algo ambiguo, porque la energía producida depende mucho de dos factores que son la velocidad del viento y la densidad del aire.

En las zonas donde se ubican los proyectos de Soluciones Prácticas en Cajamarca, la densidad del aire es un 40% inferior a la medida al nivel del mar. Por tanto la energía disponible es más baja que lo que sería al nivel del mar. (8)

## 1.5. Resumen

Recordamos la ecuación (1.4):

$$P_{elec} = \eta_{elec} \cdot C_p \cdot \frac{\rho}{2} S v^3$$

Esta relación significa que:

- La densidad de potencia es proporcional a la densidad del aire  $\rho$ . Entonces, mayor la altitud, menor la energía disponible (a igual velocidad).
- La energía que se puede aprovechar es proporcional al área  $S$  barrida por las aspas del rotor.
- La densidad de potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento, por tanto este factor es muy importante. Por ejemplo, si se duplica la velocidad, la potencia será multiplicada por 8 ( $2^3 = 8$ ).

Como consecuencia resalta la importancia del estudio preciso del recurso eólico durante un año o más, para conocer la distribución de las frecuencias de ocurrencia de las velocidades de viento a lo largo del año y poder evaluar la energía que entregará el MCA.

<sup>2</sup> Revoluciones por minuto

## 2. Sistema de microaerogeneración

---

### 2.1. Componentes

---

El diseño de un microaerogenerador es similar al de un aerogenerador de gran potencia, pero más sencillo y los materiales utilizados pueden diferir. Como este documento tiene como objeto la generación de electricidad a pequeña escala, a continuación se describirán los componentes y materiales para el diseño de un microaerogenerador. Los componentes necesarios a la generación y suministro de electricidad en sistemas autónomos de pequeña escala son los siguientes, repartidos en los componentes propios al conjunto aerogenerador y los que sirven a controlar, almacenar y distribuir la electricidad:

Conjunto aerogenerador	Sistema de control, almacenamiento y distribución de la electricidad
Hélice o conjunto rotor	Regulador eólico (o regulador de carga, diodos rectificadores y resistencia de disipación)
Multiplicadora	Batería recargable
Generador	Inversor CC <sup>3</sup> /CA <sup>4</sup>
Bastidor o tornamesa o chasis	Tablero de control y accesorios
Buje o bocamaza	Cargas
Sistema de orientación	
Sistema de control	
Cono o tapadera	
Torre soporte	

Tabla 2.a: Componentes de un sistema de aerogeneración

A continuación se trata de dar informaciones completas sobre los varios componentes de un MCA, pero se hace hincapié en lo que el diseño y por tanto los componentes incluidos puede diferir de un modelo de MCA a otro.

#### 2.1.1. El microaerogenerador

---

---

<sup>3</sup> Corriente continua

<sup>4</sup> Corriente alterna

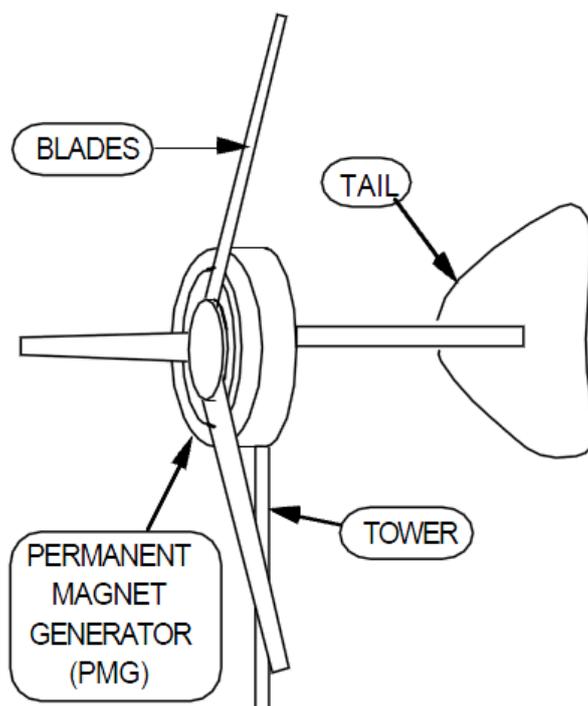


Ilustración 2.a: Componentes<sup>5</sup> de un MCA típico (9)

### 2.1.1.1. Hélice o conjunto rotor

#### 2.1.1.1.1. Dirección y orientación del eje del rotor

Dirección del eje del rotor	Orientación relativo al viento	Características
<b>Eje horizontal</b>	Barlovento <sup>6</sup>	Evita las perturbaciones generadas por la torre. Necesita buenas propiedades mecánicas de las palas y un sistema de orientación del rotor.
	Sotavento <sup>7</sup>	Posibilidad de emplear materiales más flexibles para las palas. La “sombra” aerodinámica de la torre trae mayores cargas de fatiga sobre la turbina.
<b>Eje vertical</b>		Más económicos que los de eje horizontal, al ahorrar una gran parte de la estructura, pero menos eficientes.

Tabla 2.b: Tipología de los aerogeneradores

La gran mayoría de los aerogeneradores son de eje horizontal a barlovento. (10)

<sup>5</sup> *Blades*: palas, *tail*: cola y veleta, *PMG*: GESIP, *tower*: torre soporte

<sup>6</sup> Configuración de barlovento: las aspas se enfrentan al viento.

<sup>7</sup> Configuración de sotavento: las aspas están de espaldas al viento.



A Barlovento o Proa

Ilustración 2.b: Rotor a barlovento<sup>8</sup>



A Sotavento o Popa

Ilustración 2.c: Rotor a sotavento<sup>9</sup>

### 2.1.1.1.2. Número de palas

El número de palas, o aspas, depende de la velocidad de giro requerida y del nivel de aceptación del ruido aerodinámico. Para la producción de energía eléctrica son necesarias velocidades de giro del eje del rotor suficientemente elevadas.

Las turbinas con el mayor número de palas (hasta 24) poseen un mayor par<sup>11</sup> de arranque, por tanto se pueden poner en marcha incluso con velocidades de viento muy bajas. Su velocidad de giro es baja, pues son llamadas **turbinas lentas**. Suelen utilizarse para aplicaciones de tipo bombeo de agua, por causa de la baja velocidad de giro que las hace menos apropiadas para las aplicaciones eléctricas.



Ilustración 2.d: Aerobomba con turbina lenta<sup>10</sup>

Al contrario, las turbinas con pocas palas poseen un par de arranque menor, lo que hace necesario que el viento tenga mayor velocidad para arrancarlas. Giran más rápidamente y son denominadas **turbinas rápidas**. La mayoría tiene 3 palas y están utilizadas para generar electricidad; requieren velocidades de viento de 4 a 5 m/s para su puesta en marcha y tienen potencias nominales a partir de 1 kW, para aplicaciones autónomas, hasta potencias muy elevadas. (6)

También se puede definir una tercera categoría, agrupando aerogeneradores de velocidad intermedia, que ofrecen prestaciones comprendidas entre las de las dos categorías precedentes. Tienen entre 3 y 6 palas, se utilizan cuando las condiciones de viento no son muy favorables y son en general de baja potencia. La aplicación principal es en sistemas autónomos de generación de electricidad. (6)

Un menor número de palas del rotor permite una mayor velocidad de giro de lo mismo y menores costos, pero ocasiona menor estabilidad y por lo tanto ruido aerodinámico; por ejemplo un rotor monopala hace mucho ruido, lo que resulta en un uso escaso. En general, un número de 3 palas

<sup>8</sup> <http://www.ecovive.com/los-aerogeneradores-y-su-orientacion-con-respecto-al-viento>

<sup>9</sup> *Ibid.*

<sup>10</sup> <http://www.solarplanespana.com/instalaciones.html>

<sup>11</sup> Cupla o torque

está considerado como un buen compromiso entre la velocidad de giro de la hélice y la estabilidad requerida. (11)

El parámetro que caracteriza si una turbina es lenta o rápida es la denominada velocidad específica, notada  $\lambda$  o TSR<sup>12</sup>:

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad (2.1)$$

Donde:  $R$  es el radio de la superficie barrida por las palas [m]  
 $\omega$  es la velocidad angular en la punta de las palas [rad.s<sup>-1</sup>]  
 $v$  es la velocidad del viento [m.s<sup>-1</sup>]

Por tanto se entiende que la velocidad específica es el cociente entre la velocidad tangencial en la punta de las palas con la velocidad del viento. Como  $\omega = \frac{2\pi}{60}n$ , también se puede escribir de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{2\pi Rn}{60v} = \frac{\pi Dn}{60v} \quad (2.2)$$

Donde:  $n$  es el número de revoluciones por minuto [rpm]  
 $D$  es el diámetro nominal del rotor [m]

$\lambda$  puede tener un valor entre 1 (máquinas más lentas) y 14 (máquinas más rápidas).

### 2.1.1.1.3. Forma y material de las palas

Existen muchos perfiles diversos para la forma de las palas, desde poco estudio de la aerodinámica hasta la optimización de la misma, dependiendo de la voluntad de maximizar el aprovechamiento de la fuerza del viento y del presupuesto disponible para ello.

Los materiales utilizados tienen gran variedad: (10)

- metales abaleados,
- madera trabajada,
- aluminio extruido,
- perfiles en molde de *foam*<sup>13</sup> recubiertos de tela fibra de vidrio embebido en resina de poliéster o epoxi<sup>14</sup>,
- materiales compuestos avanzados.

Los materiales tradicionales son la madera y el aluminio – éste teniendo la desventaja de ser propenso a la fatiga mecánica –, pero los materiales más usados recientemente son los plásticos y resinas. Ahora existe una clara tendencia al uso de epoxi reforzado de fibra de vidrio o de carbono (6).

Las mezclas de fibras de vidrio y de resina ofrecen el mejor compromiso entre el costo y el comportamiento aerodinámico, y facilitan la producción en serie por la utilización de moldes; la cantidad de fibra de vidrio a utilizar como refuerzo varía según las características mecánicas

<sup>12</sup> Tip-Speed Ratio

<sup>13</sup> Goma espuma

<sup>14</sup> Una resina epoxi es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o "endurecedor".

requeridas de la pieza. Existen en el mercado diferentes tipos de resina (epoxi, poliéster, etc.); en el proceso de fabricación es importante tener la hoja del fabricante para conocer el porcentaje de sólidos de que consta la resina, para conocer la cantidad de disolvente a aplicar, dado que una cantidad superior a lo recomendado generaría el deterioro de las propiedades de la resina. (10)

Entre los métodos de fabricación hay unos más fiables que otros: por ejemplo, la fabricación de las palas por dos moldes y no uno acarrea más riesgos de defectos (11).

### *2.1.1.2. Multiplicadora*

---

Los generadores eléctricos disponibles en el mercado están diseñados para altos regímenes de giro, con al menos al menos 2000 rpm, mientras que una turbina eólica gira más suavemente, no superando las 800 rpm. Por tanto se utiliza en los proyectos eólicos de medio o gran tamaño una caja multiplicadora, cuyo papel es adaptar el régimen de giro entre el rotor y el generador.

Otra opción es realizar diseños de generadores específicos que se conecten directamente al conjunto rotor sin multiplicación de velocidad. Es lo que se busca en los pequeños aerogeneradores. Por tanto el uso de generadores de imanes permanentes está difundido en este tipo de tecnología, porque cumplen con esta condición de régimen de giro. (10)

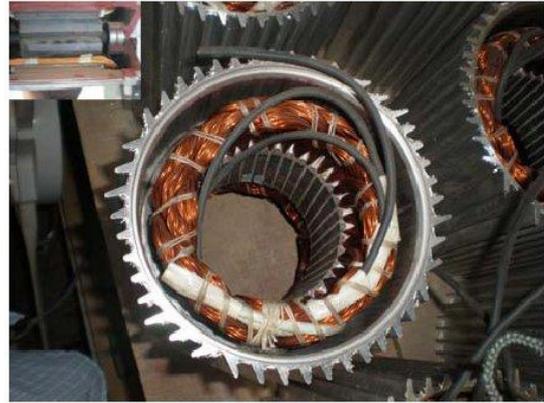
### *2.1.1.3. Máquina eléctrica o generador*

---

#### **2.1.1.3.1. Diferentes tipos de generadores eléctricos utilizados para MCAs**

- Generadores de corriente continua (dínamos): las dínamos están cada vez menos usadas porque necesitan más mantenimiento que los generadores de corriente alterna y son más caras y pesadas que los mismos. Pero son idóneas para aerogeneradores de tamaño extremadamente pequeños (decenas de vatios). (6)
- Generadores de corriente alterna (6) (10)
  - Generadores síncronos (o alternadores): giran a la velocidad igual a la de sincronismo. Requieren un circuito para crear un campo magnético en el rotor y así generar corrientes que induzcan el movimiento de lo mismo. Pueden conectarse fácilmente a un puente de diodos y son fácilmente multipolares en el caso de imanes permanentes. Como desventaja destacan la necesidad de refrigerar por aire, problemas de oscilaciones de par, la fatiga mecánica del eje y la transmisión de oscilaciones a la red. Por tanto son más adecuados para sistemas aislados que para sistemas conectados a la red.

- GESIP<sup>15</sup>: generador de imanes permanentes. En general los diseños constan de un generador multipolar con un número par de polos de 4 a 10, con una conexión directa entre el rotor y el generador eléctrico (sin caja de multiplicación). Los GESIP pueden ser de flujo axial, con los polos de imanes constantemente enfrentados en la dirección del viento, o de flujo radial, con los polos situados generalmente en el tambor del rotor, equidistantes al bobinado del estátor. En los materiales utilizados destacan la ferrita y recientemente el neodimio que presenta un mayor magnetismo que la ferrita, pero que es más caro.



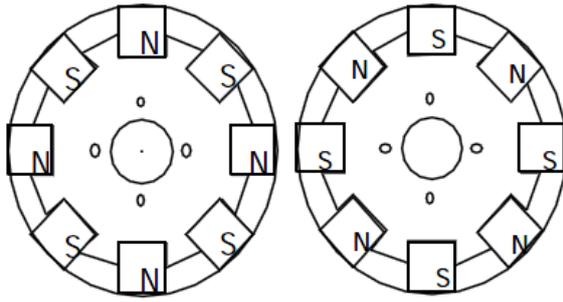
**Ilustración 2.e: Ejemplo de GESIP fabricado artesanalmente (10)**

- Generadores de excitación independiente: permiten controlar de forma sencilla la velocidad estatórica y suelen utilizarse en sistemas con conexión a la red.
- Generadores asíncronos (o de inducción): giran a velocidad distinta de la de sincronismo. Tienen como ventaja de ser robustos y de poder refrigerarse de forma cerrada. Como necesitan una excitación inicial para crear el campo magnético, precisan una conexión a la red eléctrica o en caso de un sistema aislado, un banco de condensadores que de este arranque. Otra desventaja es que no se puede prescindir de la multiplicadora, salvo aumentando mucho el número de polos y haciendo así el diámetro demasiado grande.
  - de jaula o de ardilla
  - de rotor devanado: son más económicos que otros generadores (asíncronos de jaula o ardilla o síncronos).

#### **2.1.1.3.2. Detalles sobre los generadores de imanes permanentes**

El tipo GESIP está predominante en las aplicaciones de aerogeneradores autónomos a pequeña escala; la principal ventaja de este tipo de generador es que puede trabajar en un amplio rango de velocidades de giro. Además captan más energía que generadores asíncronos. Los imanes permanentes, de ferrita o de neodimio (más caro pero más eficiente), no se producen en el Perú y por lo tanto se deben importar de China o Europa (por ejemplo de España). Es una parte importante de los costos, ya que cada imán permanente vale de US\$ 10 a 12. (11)

<sup>15</sup> Generador Eléctrico Síncrono de Imanes Permanentes. El GESIP es llamado en inglés *PMG (Permanent Magnet Generator)*.



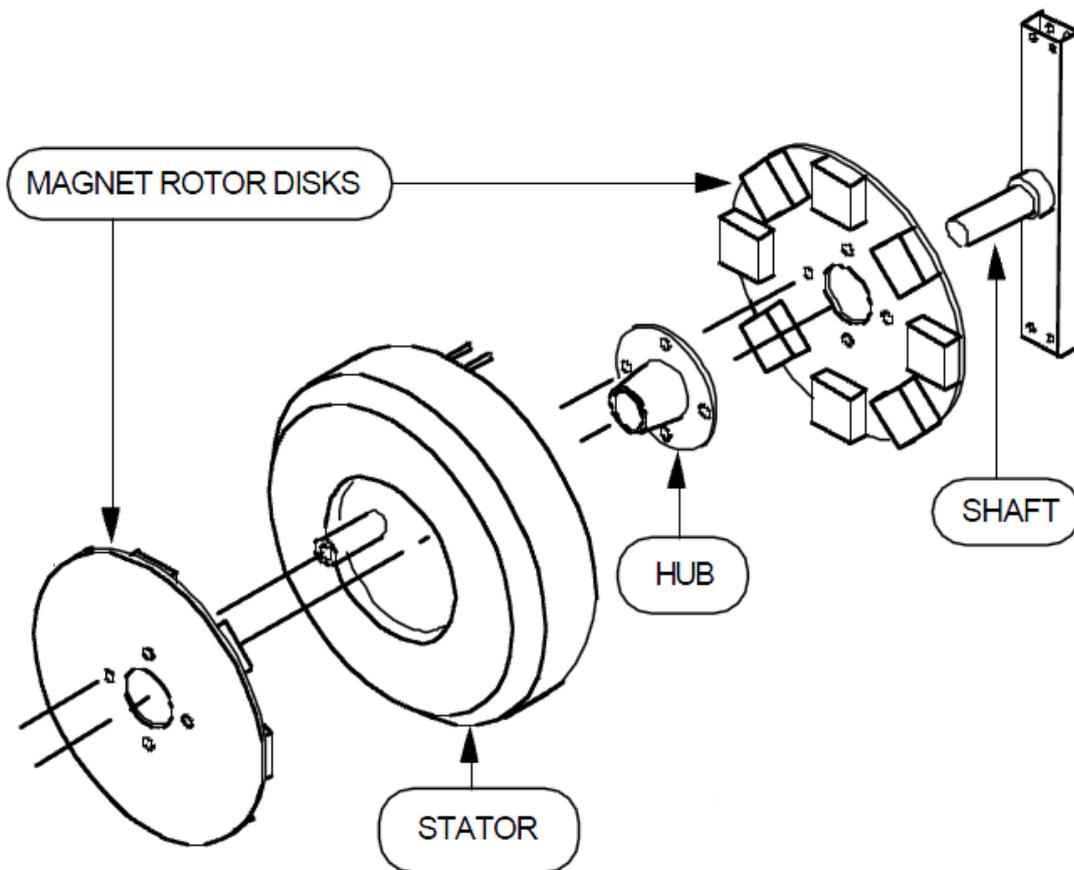
**Ilustración 2.f:** Los imanes de los rotors de un GESIP se ubican de tal manera que se atraigan (12)



**Ilustración 2.g:** Bobinas para el estátor (12)

En general, los GESIP son fabricados de manera similar al GESIP desarrollado por ITDG, lo cual es estampado por la Ilustración 2.h. Los imanes están ubicados en dos discos rotors, con polos opuestos de manera a atraerse (cf. Ilustración 2.f). Están fijados en los rotors mediante resina e hilos de acero inoxidable, que no posee propiedades magnéticas. Se debe tener cuidado con la temperatura en los imanes, porque si se eleva demasiado, la resina ablanda y los imanes pueden moverse. (12) (11)

El estátor, que puede ser de resina, es la parte donde se encuentran las bobinas de hilos de metal conductor (en general cobre) enrolladas. Se monta en “sándwich” entre los dos rotors. (12)



**Ilustración 2.h:** Generador de imanes permanentes desarrollado por ITDG (9)

En las bobinas del estátor circula una corriente eléctrica alterna generada por la variación del flujo del campo magnético, producida por el movimiento del rotor relativo al estátor. Por construcción, el GESIP genera una corriente alterna trifásica.

Antes de empezar a utilizar el generador, se debe realizar pruebas de buen funcionamiento: (12)

- Prueba de rotación: el rotor debe girarse de manera libre, sin ruidos de fricción o de rascaduras. El estátor no debe tocar los rotores cuando están girando.
- Prueba del equilibrio del peso: se debe verificar el equilibrio del peso en el conjunto generador sólo, en el conjunto rotor sólo y en el ensamblaje de los dos. Para ello se cuelgan diferentes pesos en 4 puntos diferentes, repartidos en círculo (cf. Ilustración 2.i). Si en uno de los puntos, se necesita más peso que en los otros para que el ensamblaje empecé a moverse, el mismo no está equilibrado. Para compensar el desequilibrio se deben añadir pequeños pesos.
- Prueba eléctrica: se puede utilizar un multímetro o si no se dispone de este aparato, un foco de 3 V. El tipo de error que se puede detectar gracias a esta prueba es el montaje al revés de una bobina.

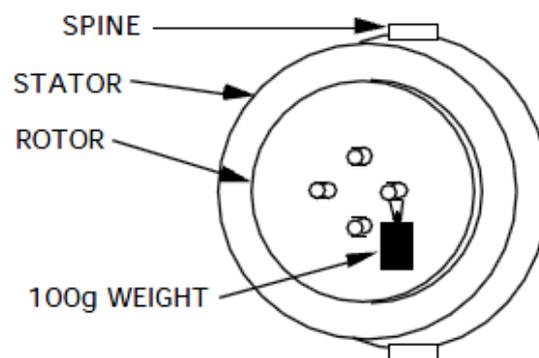


Ilustración 2.i: Prueba del equilibrio del conjunto generador (12)

#### 2.1.1.4. Bastidor o tornamesa o chasis

El bastidor es una estructura de piezas de acero soldadas donde irá fijado el estátor y así sostendrá todo el conjunto rotor-generador y la cola con veleta. Adecua la posición del eje del rotor con el eje de apoyo. El acero puede ser reforzado con carbono para mejorar las propiedades de torsión y la resistencia a la fatiga.

#### 2.1.1.5. Buje o bocamaza

El buje acopla el chasis del aerogenerador a la torre soporte. Debe ser robusto, por ejemplo haciéndolo de fundición, y sencillo de instalar. Rodamientos permitirán que el chasis se pueda girar suavemente en torno al eje vertical para enfrentar las palas a la dirección del viento. (10)

#### 2.1.1.6. Sistema de orientación

Para los aerogeneradores de eje horizontal orientados a barlovento, lo más común es el sistema de orientación por veleta en cola. Al incidir el viento, la vela empuja hasta alinear el eje del rotor en la dirección del viento. Cuando el generador alcanza la velocidad nominal, empieza a actuar el sistema de regulación. La veleta puede ser de acero, como en el caso del SP-500 de Soluciones Prácticas o de acero galvanizado como en el ATR-500 de WAIRA. (10)

Si el aerogenerador es orientado a sotavento, la orientación se logra mediante la acción directa del viento sobre el rotor, lo que induce inestabilidades en el mismo. (10)



Ilustración 2.j: IT-PE-100 con su veleta en cola (8)

#### *2.1.1.7. Sistema de control: regulación y frenado*

La necesidad de un sistema de control está debida a la irregularidad del estímulo dispensado por el viento, que puede ser muy débil, o muy fuerte incluso con ráfagas. Por tanto, las exigencias climáticas sufridas por los aerogeneradores son notables, y eso complica la generación de energía eléctrica, puesto que algunas variables deben estar controladas, como la velocidad de giro del rotor, que es directamente relacionada con la velocidad de soplido del viento. El principal objetivo del sistema de control es la limitación de las rpm y de la generación de potencia en condiciones de vientos muy fuertes. No se debe confundir entre el frenado (o bloqueo) y la regulación de la velocidad de giro o sistema de pérdida de potencia, que protege el sistema de las sobrecorrientes cuando la velocidad del viento supera la de diseño.

Los aerogeneradores más modernos disponen de sistemas de control más complejos que buscan también siempre la mejor eficiencia de conversión de energía.

- Para sistemas de regulación aerodinámica se suele recurrir a elementos mecánicos sencillos:
  - Regulación por desorientación: cuando la velocidad del viento supera el valor nominal de giro del rotor, el eje de éste sale de la dirección del viento, lo que

disminuye el área barrida por el viento y por tanto la energía cinética del mismo a transformar en energía eléctrica. La instalación de tal sistema de regulación necesita que el centro de empuje del rotor no quede alineado con el centro de rodamiento de orientación.

- Regulación por cabeceo: el mecanismo es parecido al anterior, pero esta vez la desorientación ocurre en el plano vertical.
- Regulación por pérdida aerodinámica: el primer sistema de control aerodinámico diseñado fue de pérdida aerodinámica y fue considerado innovador. El principio es cambiar el ángulo de ataque de las aspas, diseñándolas con materiales que las hacen flexibles, así que cuando la velocidad está demasiado elevada, se genera una discontinuidad en su aerodinámica. Pero se producen vibraciones importantes que vuelven el mecanismo inestable. Por eso, ahora se prefiere diseñar un perfil de aspas optimizado y luego dotarlo de un movimiento axial longitudinal para cambiar la superficie de pala enfrentada al viento (método de “cambio de ángulo de ataque”); este mecanismo es muy eficiente y se puede llegar a parar un aerogenerador dentro de una tormenta.
- Regulación por cambio de paso pasivo: utiliza las fuerzas aerodinámicas e inerciales (especialmente la fuerza centrífuga, que aumenta con la velocidad de giro del rotor) para que las palas se flexionen y giren sobre su eje, ofreciendo así una menor superficie al viento. Eso se consigue con materiales de baja resistencia a la torsión o mediante contrapesos.
- Frenados:
  - Frenados mecánicos:
    - Freno por zapata: el más rudimentario, poco eficiente. Mantiene las revoluciones del rotor por debajo de un cierto límite. Puede operar de forma autónoma o ser accionado por un operador (ser humano o microcontrolador).
    - Freno centrífugo: autónomo, se activa cuando el rotor llega a determinadas revoluciones. El más usual de estos sistemas es la caja de cambio mecánica. No es muy usado por las pérdidas mecánicas de potencia que ocasiona.
  - Frenado eléctrico: disipa toda la energía en forma de calor emitido por una carga resistiva. Por lo tanto el rotor gira más lentamente. Existe un bloqueo por cortocircuito, que se opera desde un controlador electrónico, pero al crear corrientes elevadas, es peligroso para la máquina.

#### *2.1.1.8. Cono o tapadera*

---

El cono protege a los elementos del generador y aumenta la aerodinámica del conjunto. Como materiales se suelen usar, de modo similar a las palas, mezclas de resina con fibra de vidrio. La tapadera posterior, si existe, se hace de lo mismo.

Tanto el cono como la tapadera son elementos estilizadores, que no tienen funciones ni estructurales ni productivas, pero que protegen el aerogenerador y canalizan el viento.



Ilustración 2.k: Cono de protección (resina con fibra de vidrio) (8)

#### 2.1.1.9. Torre soporte

El MCA no se instala al nivel del suelo, pero en una altura adecuada al diseño; a partir de cierta altura por encima del suelo, el viento es más fuerte y menos turbulento (véase el concepto de rugosidad, §2.2.2.1). Para instalar el MCA en esta altura de diseño (la cual depende de las características orográficas, de velocidad del viento y de las vías de acceso, entre otros (7)), se requiere diseñar y construir una estructura que soporte la máquina generadora, llamada torre soporte. Este elemento es importante en cuanto al método de elevación y fijación a la altura adecuada, especialmente en el caso de piezas grandes que hacen difíciles su manipulación y transporte. Su selección y diseño pueden resultar primordiales si hay traslados escabrosos por la sierra, selva o desierto.

La mayoría de los instaladores fabrican sus propias torres soporte, pero existe también un mercado comercial de ellas. La altura de las torres soporte para MCA varía de 6 a 40 metros (11), pero por razones de costo, seguridad y mantenimiento, la altura óptima se sitúa generalmente entre 10 y 20 metros (9).

Si se fabrica la torre soporte, en el caso de aerogeneradores muy pequeños y por tanto de alturas de 6 a 8 m, basta usar como torre un tubo galvanizado estándar de 2.5 a 3" con espesuras de 4 mm. Para mayores alturas se ve necesario preparar estructuras metálicas más robustas, de forma triangular, cónica u otra. (7)

#### 2.1.1.10. Resumen

Componente	Opcional?	Descripción
<b>Hélice o conjunto rotor</b>	No	Hélice generalmente de eje horizontal, con cierto número de palas diseñadas para captar de manera óptima la energía cinética del viento

<b>Multiplicadora</b>	Si	Acoplamiento entre la hélice y el generador, para aumentar la velocidad. En general para MCAs, el acoplamiento es directo.
<b>Generador</b>	No	Máquina rotativa que convierte energía rotativa mecánica en energía eléctrica. En el caso de MCAs se utilizan generalmente generadores síncronos de imanes permanentes.
<b>Bastidor o tornamesa o chasis</b>	No	Pieza que sostiene el conjunto rotor-generador y la cola con veleta. Adecua la posición del eje del rotor con el eje de apoyo.
<b>Buje o bocamaza</b>	No	Acopla el chasis del aerogenerador a la torre soporte.
<b>Sistema de orientación</b>	No	Orienta el eje del rotor en la dirección del viento. Generalmente un sistema por veleta en cola.
<b>Sistema de control: regulación y frenado</b>	No	El sistema de control es limita las rpm y la generación de potencia en condiciones de vientos muy fuertes.
<b>Cono o tapadera</b>	No	El cono o tapadera protege los elementos del generador de agresiones exteriores y aumenta la aerodinámica del conjunto.
<b>Torre soporte</b>	No	Eleva el aerogenerador a una altura adecuada y lo soporta.

Tabla 2.c: Componentes del MCA

## 2.1.2. Sistema de control, almacenamiento y distribución de la electricidad

Una vez generada la electricidad por el MCA, se requiere componentes adicionales que realicen el almacenamiento de la energía – ya que se trata de sistemas autónomos en los cuales la generación y el consumo de la electricidad no son necesariamente simultáneos – y su distribución hacia los puntos de consumo. (13)

### 2.1.2.1. Diodos rectificadores

Se pueden utilizar dos diodos rectificadores para convertir la corriente alterna generada por el aerogenerador en corriente continua. Así se puede almacenar en la batería, lo que es imposible con corriente alterna. Los bornes positivos de los diodos rectificadores se conectan a los bornes positivos de la batería; vale igualmente para la conexión de los bornes negativos. Los cuatro bornes restantes son bornes CA<sup>16</sup> para conectar al estátor.

Pero como se verá en el párrafo siguiente, el sistema de rectificación de la corriente se puede integrar al regulador de carga de la batería.

<sup>16</sup> Corriente alterna

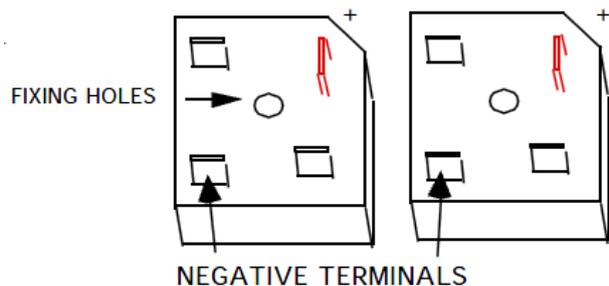


Ilustración 2.l: Esquema de diodos rectificadores<sup>17</sup> (12)



Ilustración 2.m: Foto de 2 diodos rectificadores (12)

Para poder almacenar la corriente en la batería, es necesario que sea corriente continua. De hecho, como la corriente alterna cambia de sentido periódicamente, sería lo mismo con las reacciones químicas que se desarrollan en la batería, impidiendo así que la energía eléctrica se convierta en energía química de manera estable (cf. anexo B).

Como el generador eólico produce corriente alterna, es necesario utilizar sistemas de rectificación de la corriente para transformarla en corriente continua.

### 2.1.2.2. Regulador (o controlador) eólico

Las dos funciones principales del regulador eólico son:

- Proteger la batería de sobrecargas y descargas profundas,
- Invertir la corriente alterna producida por el generador en corriente continua que pueda almacenarse en baterías.

El regulador debería trabajar en tres fases:

- 1) regulación del ingreso de la energía cuando hay ráfagas de viento,
- 2) corte del ingreso de energía cuando la batería esté cargada,
- 3) corte de la energía al usuario si la batería se encuentra en los límites de descarga recomendados

Diferentes tipos de baterías requieren diferentes reglajes del regulador: por ejemplo, baterías selladas son cargadas a un voltaje menor para evitar emisión de gas, mientras que baterías abiertas pueden gasear y por eso aceptan voltajes más elevados. (9)

La característica principal de un regulador, de tipo fotovoltaico o eólico, es la potencia máxima que puede soportar, que se obtiene del producto de la intensidad máxima por la tensión nominal.

#### 2.1.2.2.1. Regulador de carga simple con diodos rectificadores y resistencia de disipación

<sup>17</sup> Fixing holes: huecos de fijación; negative terminals: bornes negativos

Se puede disociar las dos funciones, utilizando un regulador de carga simple, recibiendo corriente ya rectificada mediante un puente de diodos rectificadores (como se vio en el párrafo anterior), o se pueden utilizar reguladores dichos eólicos, que integran los diodos de rectificación de la corriente.

Si se disocian las dos funciones, normalmente no vale utilizar un regulador fotovoltaico (cf. el documento (14)), porque al desconectar el aerogenerador de la batería, lo descargan y así puede girar libremente a velocidades elevadas, lo que puede inducir problemas mecánicos, hasta destrozos (9). Pero al conectar una resistencia monofásica (cf. Ilustración 2.n) para que el aerogenerador no quede en vacío, se evitan los problemas tan eléctricos en la reconexión, como mecánicos del rotor; es la solución adoptada en los proyectos de Soluciones Prácticas en el Perú (10) (8). En las fases 1) y 2), el controlador deriva la energía a una carga secundaria, por ejemplo a una resistencia para que la energía excedente se disipe por efecto Joule (para la significación de este término, véase el anexo D.4).

Para sistemas fotovoltaicos existen tres generaciones de reguladores electrónicos de carga, pero sólo dos de ellas son aplicables a MCAs, la última generación siendo especialmente pensada para sistemas fotovoltaicos (cf. (14)).



**Ilustración 2.n: Tablero de control conllevando el regulador y tablero de control, y resistencia de disipación debajo, en El Alumbre (8)**

#### *Primera generación: reguladores con control en serie o paralelo*

El control en serie o paralelo (*shunt*) corresponde a la posición del interruptor de control de generación. El regulador monitoriza constantemente la tensión de la batería y interrumpe la carga o la descarga cuando el voltaje alcanza los valores límites.

#### *Segunda generación: reguladores de modulación de ancho de pulso*

Los reguladores de ancho de pulso o PWM<sup>18</sup> han permitido mejorar la recarga de las baterías de 70% (con los antiguos reguladores serie y paralelo) a 100% de la capacidad. El regulador entrecorta la corriente recibida del puente de diodos rectificadores y la envía a la batería en forma de pulsos. Gracias a la lectura precisa de la tensión en las bornes de la batería, puede regular la frecuencia y la duración de los pulsos, realizando así la conexión y la desconexión de la batería y del MCA de manera óptima. (8)

El precio varía de 3 a 5 euros por amperio. Ofrece una buena relación calidad / precio.



Ilustración 2.o: Regulador de marca Steca en Amantani, proyecto CER-UNI (15)



Ilustración 2.p: Regulador con caja de conexiones en el tablero de control, y contador de Ah, en Amantani, proyecto CER-UNI (15)



Ilustración 2.q: Regulador de marca Phocos en Alto Perú, Cajamarca (16)



Ilustración 2.r: Regulador de marca Steca en Yerba Buena Alta, Cajamarca (17)

### 2.1.2.2.2. Regulador eólico integrando la función de rectificación de la señal

<sup>18</sup> Pulse Width Modulation

Este regulador combina la función de control de la carga de la batería, así como la función de rectificación de la corriente alterna en corriente continua mediante diodos rectificadores. Integra también resistencias para evacuar los excedentes de energía sin dejar el MCA girar en vacío.

Un controlador eólico para pequeñas potencias, trabajando correctamente en las tres fases de control, se encuentra difícilmente en el mercado. Los fabricantes de MCAs suelen desarrollar sus propios reguladores eólicos. El diseño correcto de éste, para la instalación en un aerogenerador concreto. Se hace imprescindible el estudio, análisis y control de la onda generada, la realización de las pruebas de cargas, para desembocar en el diseño de un aparato adecuado al comportamiento de la señal eléctrica generada por el MCA. El regulador eólico incluye resistencias para recibir la corriente excedente. (10)

### 2.1.2.3. Batería

---

Similarmente a los sistemas fotovoltaicos domésticos, el MCA está dedicado a suministrar electricidad de manera autónoma, sin conexión a una red; por tanto se necesita un medio de almacenar la electricidad generada durante las horas de viento para que pueda estar empleada en las horas o días con viento (en la noche en general el viento es menos fuerte).

Por ello se necesita un acumulador de energía eléctrica, o batería recargable, que transforma de manera reversible la energía eléctrica en energía química para poder almacenarla.

#### 2.1.2.3.1. Características y tipos de baterías

Diferentes conjuntos de elementos químicos pueden ser utilizados para fabricar baterías: plomo-ácido, níquel-cadmio (Ni-Cd), níquel-hierro (Ni-Fe), iones de litio (Li-ion), níquel-hidruro metálico (Ni-MH), etc. Las baterías de plomo-ácido están muy utilizadas porque permiten un amplio rango de aplicaciones y porque una buena relación calidad / precio; los microaerogeneradores no constituyen una excepción en cuanto a esa amplia utilización.

Una batería de plomo-ácido es un conjunto de varios acumuladores de plomo-ácido conectados en serie. Es caracterizada por:

- la capacidad: es la cantidad de corriente que puede entregar la batería en un número de horas determinado, a una temperatura de referencia (en general 25°C). La capacidad estándar está determinada descargando la batería con una corriente constante durante 10 horas, sin que la tensión disminuya debajo del límite de descarga; la capacidad se nota  $C_{10}$ . En el caso de las pequeñas aplicaciones eólicas, se habla en general de una capacidad de descarga en 20 o 100 horas, o sean respectivamente  $C_{20}$  o  $C_{100}$ . Se expresa en amperio-hora (Ah)<sup>19</sup>.
- la tensión nominal: depende del número de elementos de la batería. La tensión nominal de un acumulador de plomo-ácido es de 2 V. Entonces una batería clásica de 6 elementos tiene una tensión nominal de 12 V. La tensión en circuito abierto entre las bornes de la batería depende del estado de carga; para una batería de 12 V puede variar entre 11 y 12.6 V. Se considera que la batería está descargada si la tensión disminuye hasta 10.8 V

---

<sup>19</sup> El amperio-hora es una unidad de carga eléctrica. La unidad de carga del Sistema Internacional (S.I.) es el culombio C. 1 Ah = 3600 C

(o sea, si la tensión de cada elemento alcanza 1.8 V). Al contrario, la tensión en carga es más elevada (13-14.5 V). Existen también baterías de 6 V, 24 V, 48 V y otros.

- la corriente máxima que puede entregar durante unos momentos (corriente de cresta).

Un fenómeno conocido como efecto Peukert muestra que descargar la batería con corrientes mayores disminuye la carga entregable de la batería. Por ejemplo, someter la batería a una corriente de 10 A no descarga la misma dos veces más que con una corriente de 5 A, sino un poco más (cf. anexo C). (18)

Las características requeridas a la batería son las siguientes: (19)

- Capacidad mínima de carga según el dimensionamiento (cf. 2.2.7)
- Baja autodescarga, para evitar pérdidas de energía
- Poco o ningún mantenimiento (en este caso la batería está dicha “libre de mantenimiento”) para facilitar el manejo por usuarios que no disponen de una formación técnica
- Larga vida útil
- Alta eficiencia
- Operación posible en diferentes climas
- Bajo costo

Diferentes tipos de baterías de plomo-ácido pueden ser considerados: (20)

	Batería de automotriz		Baterías estacionarias <sup>20</sup>		
<i>Abierta / sellada</i>	Baterías abiertas		Baterías selladas, reguladas por válvula (VRLA)		
<i>Tipo de batería</i>	B. de arranque	B. de automotriz mejorada	B. tubular estacionaria	B. tubular gelificada	Batería AGM
Descripción	Batería normal de carro. Electro líquido.	Electrolito líquido. Electrodo (placas) más gruesos que en la batería de carro.	Mucho electrolito.	Electrolito de tipo gel. Pueden montarse en cualquier posición.	Electrolito absorbido en fibra de vidrio. Pueden montarse en cualquier posición.
Nivel máx. de descarga	30%	50%	50%	80%	80%
Autodescarga	10-20% / mes			< 3%	< 3%
Vida útil	2 a 3 años	1000-2000 ciclos con descarga de 15-20%	2500 ciclos con descarga 20%, 1200 ciclos con descarga de 50%. 10 años	10 años	
Características	Buen ratio capacidad / costo, fácilmente		Precio elevado, escasa		

<sup>20</sup> A la diferencia de las baterías de arranque, utilizadas en carros, deben proporcionar una corriente continua de baja intensidad durante largos periodos, y poder descargarse sin dañarse.

	disponible, técnica sencilla, infraestructura de servicio. Pero funcionamiento no adecuado.	disponibilidad			
<b>Mantenimiento</b>	Echar agua destilada 1 a 2 veces al año para renovar el electrolito	Echar agua destilada 1 a 2 veces al año para renovar el electrolito	Echar agua destilada 1 vez al año para renovar el electrolito	No, pero cuidar el manejo	Verificar el nivel de electrolito después de unos años

**Tabla 2.d: Tipos de baterías**

Una descarga demasiado profunda se traduce por una sulfatación de la batería y la daña irremediablemente. La sobrecarga destruye el agua del electrolito y el nivel de éste baja rápidamente, agravando el desgaste de las placas.

La vida útil de una batería depende **críticamente** del manejo. Por una misma batería, la duración puede variar del simple al triple según la utilización. Entonces el regulador de carga es un componente muy importante, ya que protege la batería de sobrecargas y descargas profundas.

Es aconsejable no utilizar una batería de arranque de carro común (de plomo-ácido), porque en su uso común suele estar cargada completamente y entregar una corriente muy alta, pero durante muy poco tiempo, para el arranque del motor. Así se ve que el objetivo es diferente del almacenaje de electricidad en el contexto de un MCA. Una alternativa es de utilizar baterías de tipo arranque mejorado, que tienen placas más gruesas y más electrolito. No son selladas y requieren un mantenimiento bajo de 1 a 2 veces por año, consistiendo en echar agua destilada para renovar el electrolito. Las baterías de arranque mejorado permiten 1000 a 2000 ciclos de carga/descarga de 15 a 20 % cada uno y son más resistentes a las descargas de 50 % que las baterías normales de arranque.

En el caso de baterías tubulares gelificadas se liberan oxígeno y hidrógeno durante la reacción, que se recombinan en seguida si la intensidad y/o la tensión de carga no están demasiado elevadas, para volver a formar el gel. Si no se carga de manera correcta y que se libera gas, éste se pierde definitivamente. Como está sellada, no será posible renovar el electrolito, causando una reducción de la duración de la batería.

### 2.1.2.3.2. Influencia de la temperatura

Las baterías de plomo-ácido son normalmente diseñadas para operar a una temperatura de 25°C; cuando la temperatura aumenta, la capacidad en Ah se incrementa. Sin embargo, esto no significa que a mayor temperatura se obtengan mejores resultados. De hecho, la aceleración de la reacción de oxidación en la batería provoca sulfatación, o sea corrosión interna por sulfato de plomo. Entonces un almacenamiento prolongado de una batería de plomo-ácido a temperaturas superiores a los 25°C acorta su vida útil. Además, al aumentar la temperatura de almacenamiento se genera un fenómeno de autodescarga; la tasa de autodescarga dobla cada incremento de 10°C de la temperatura. (21)

En climas calientes y húmedos con temperaturas mayores a los 30°C, se recomienda utilizar una batería abierta más que sellada, porque la humedad reduce la vida útil de la batería. Con baterías abiertas al menos se puede tratar de ver cuál es el problema. (22) (19)

### 2.1.2.3.3. Marcas y precios de baterías

Marca	País	Tipo	Precio
ETNA		Arranque (carro)	S/.200-300
RECOR		Arranque (carro)	S/.200-300
CAPSA	Colombia	Solar estacionaria abierta	S/.200
SONNENSCHN	Alemania	Tubular gelificada	US\$ 500
BOSCH	Alemania	Libre de mantenimiento	
VARTRA			

Tabla 2.e: Ejemplos de marcas de baterías



Ilustración 2.s: Batería ETNA en Los Uros, Puno (15)

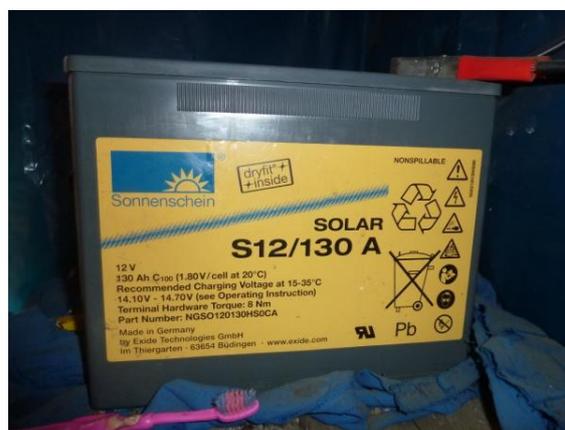


Ilustración 2.t: Batería solar Sonnenschein en Alto Perú, Cajamarca (16)



Ilustración 2.u: Batería estacionar CAPSA en El Alumbre, Cajamarca (8)

#### 2.1.2.4. Inversor CC/CA

Es un dispositivo que convierte la corriente continua (CC) almacenada en las baterías, por ejemplo de tensión 12 V en corriente alterna (CA), por ejemplo de tensión 220 V. En el mercado se encuentran en general inversores de onda sinusoidal pura o semisinusoidal.

Los pequeños aparatos a los cuales los MCAs suministran electricidad se pueden conseguir

En El Alumbre (Cajamarca), la ONG Soluciones Prácticas instaló MCA de potencia nominal 100 W, con inversores de 300 W.

funcionan do con CC, aunque no sea



Ilustración 2.v: Inversor 12V CC/230V CA de marca Xantrex, potencia 300 W, en El Alumbre

siempre fácil. Además, el inversor es un componente que induce pérdidas de eficiencia, los más eficientes ofreciendo un rendimiento de 90%. Sin embargo, para sistemas de potencia alrededor de 100 Wp, es factible, pero no siempre recomendable, incluir un pequeño inversor; este permitirá facilitar la compra de cargas, porque a veces resulta difícil encontrar aparatos que funcionan en CC (radio, TV). Para potencias más grandes (2000 Wp) se vuelve ventajoso añadir un inversor.

Se debe notar que todos los aparatos portátiles (celulares, laptops) funcionan con corriente continua; en el comercio siempre se venden con cargadores CA porque se suponen que se van a recargar conectándolos a la red. En este caso, se puede considerar conseguir los cargadores que permiten conectarlos directamente a una pequeña instalación sin inversor. (8)

Para pequeñas potencias, la decisión de incluir o no un inversor se podrá hacer según los criterios de la Tabla 2.f, incluyendo criterios económicos:

Ventajas del inversor	Desventajas del inversor
Menos pérdidas de energía por efecto Joule en los cables largos <sup>21</sup>	Costo
Más disponibilidad de cargas en CA que en CC, a costos menores	Pérdidas de eficiencia
	Es un aparato más: por tanto aumenta la probabilidad de malas conexiones la probabilidad de fallas

Tabla 2.f: Ventajas y desventajas de constar con un inversor

Por fin, la onda sinusoidal generada por el inversor puede ser de diferentes formas: senoide pura, semisensoide o cuadrada. Algunos aparatos no soportan ondas cuadradas, mientras que la senoide pura, la más costosa, está adecuada para cualquiera. (8)

<sup>21</sup> De hecho, en CC (bajo voltaje), la corriente necesaria para hacer funcionar un aparato de misma potencia es mucho mayor que en CA, ya que la potencia es el producto de la tensión y de la intensidad (cf. anexo D.4).

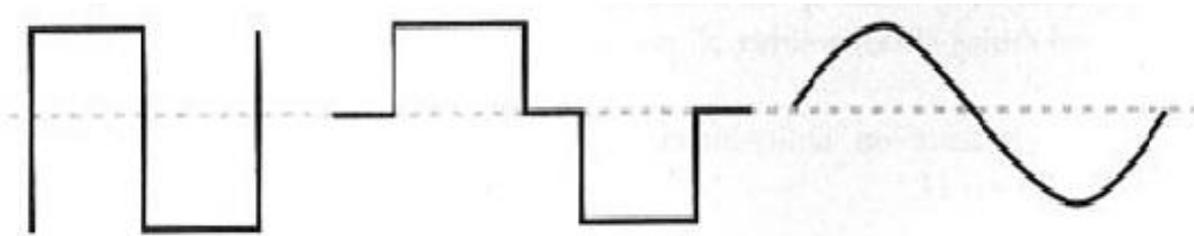


Ilustración 2.w: Diferentes tipos de ondas. De izquierda a derecha: cuadro, semisinusoide y senoide pura. (23)

- Inversores de onda cuadrada: son los más baratos, pero también son los menos eficientes. Producen demasiados armónicos que generan interferencias, o sea ruido. Pero si se necesita la corriente alterna únicamente para alimentar un televisor, una computadora o un aparato eléctrico pequeño, se puede utilizar este tipo de inversor. (24)
- Inversores de onda semisinusoide u onda sinusoidal modificada: son más sofisticados y caros que los inversores de onda cuadrada. Utilizan técnicas de modulación de ancho de impulso: el ancho de la onda es modificada para acercarla lo más posible a una onda sinusoidal. Generan menos armónicos. Ofrecen la mejor relación calidad / precio para la conexión de iluminación, televisores o variadores de frecuencia. (24)
- Inversores de onda senoide u onda sinusoidal pura: con una electrónica más elaborada se puede alcanzar una onda sinusoidal pura, pero naturalmente estos inversores se consiguen a un precio mayor. Actualmente existen en el mercado inversores sinusoidales con una eficiencia del 90% o más, dependiendo de la potencia. La incorporación de microprocesadores de última generación permite aumentar las prestaciones de los inversores con servicios de valor añadido como control remoto, medición de energía consumida, selección de batería, etc. (24)

#### 2.1.2.5. *Tablero de control y accesorios eléctricos*

Para hacer las conexiones entre los diferentes componentes se necesitan cables, interruptores, fusibles, disyuntores diferenciales, etc. En inglés el conjunto de estos elementos es llamado BOS (*Balance Of System components*).

- Tablero de control: tablero donde están colocados el regulador, una caja de conexiones que sirve a conectar de manera limpia los diferentes componentes mediante cables, los fusos, los disyuntores...
- Cableado: para evitar pérdidas de potencia por efecto Joule, es mejor que los cables no sean muy largos, o sea que el MCA esté cerca de las cargas. Si no, se deberá aumentar la sección de los cables. De hecho, la resistencia de un cable es proporcional a su largo e inversamente proporcional a su sección (cf. anexos D.2.1 y D.4). Otra alternativa es de aumentar la tensión nominal de las baterías para disminuir la intensidad de corriente circulando (cf. anexo D.4).
- Interruptores: mecanismo que permite conectar o desconectar los componentes, por motivos de seguridad o tareas de mantenimiento

- Desconectores: cada componente en un sistema debe ser capaz de desconectarse de todas las fuentes de energía.
  - Fusibles: los fusibles consisten en un hilo metálico o cable que se quemará cuando la corriente que pase a través del fusible exceda un máximo predeterminado, que abre el circuito para evitar que los cables se dañen (25). Una vez que un fusible se ha quemado, hay que reemplazarlo.
  - Interruptores diferenciales o disyuntores: los interruptores diferenciales, también llamados disyuntores, a diferencia de los fusibles, no necesitan ser reemplazados. Pueden ser disyuntores termomagnéticos, o llaves termomagnéticas. Cuando la corriente excede el amperaje permitido por el diferencial, el circuito se abre y se detiene el flujo de corriente. (25)
- Puestas a tierra: la masa, o tierra, limita el voltaje debido a tormentas, subidas de corriente o contactos con líneas de alta tensión. Además proporcionan una protección frente a derivaciones de descargas en personas.
- Contador o medidor: aparato que mide el consumo de energía, en Wh. También se pueden utilizar “contadores de Ah” que miden los Ah (carga) en vez de los Wh (energía).



Ilustración 2.x: Contador de Ah del CER-UNI en la isla de Amantani, Puno (15)

### 2.1.2.6. Cargas

Sea sin o con inversor, en el ámbito de pequeñas instalaciones domiciliarias, se deben instalar cargas de baja potencia. Una carga es un aparato eléctrico que consuma energía. En cuanto a la iluminación, se recomienda utilizar focos ahorradores de tipo CFL<sup>22</sup> o LED<sup>23</sup> y no lámparas incandescentes, que tienen un rendimiento muy bajo. Como se mencionó en el párrafo anterior, los aparatos portátiles funcionan todos en CC y en este caso se deberían buscar los cargadores correspondientes en CC.

Otros aparatos como televisor o radio se encuentran también funcionando en CC, aunque eso a veces resulta más difícil.

Aparatos comunes en hogares conectados a la red, como una licuadora, lamentablemente en general no pueden estar utilizados en el ámbito de muy pequeños MCAs. Una licuadora (potencia 300 W), una refrigeradora (350 W) o una lavadora (500 W) necesitarían una corriente demasiado alta para poder funcionar.

Cargas	CC	CA
<b>Focos ahorradores CFL o LED</b>	Características típicas: 11 W, 12 V Marcas: AECA Solsum Precio variable : S/.25-80	S/.20-30

<sup>22</sup> Compact Fluorescent Lamp o Lámpara Fluorescente Compacta

<sup>23</sup> Light-Emitting Diode o Diodo Emisor de Luz

<b>Radio</b>	Radio de 12 V, 4 a 5 W	
<b>TV</b>	Pequeño TV en negro y blanco o ahora también en colores, de 12 V S/.200	S/.800
<b>DVD</b>		
<b>Cargador de celular</b>	A conseguir a parte del celular	Común, vendido con el celular
<b>Cargador de laptop</b>	A conseguir a parte del laptop	Común, vendido con el laptop

Tabla 2.g: Cargas

### 2.1.2.7. Resumen

Componentes	Opcional?	Características
<b>Batería recargable</b>	No	Existen diferentes tipos de baterías. Debe ser elegida tomando en cuenta el precio, la facilidad de mantenimiento, la duración, la disponibilidad en el mercado. Según el tipo, puede tener un costo importante.
<b>Regulador eólico (o regulador de carga + diodos rectificadores + resistencia de disipación)</b>	No	Componente muy importante que invierte la corriente alterna generada por el MCA en corriente continua que se almacene en una batería y que protege la batería de sobrecargas y descargas profundas, permitiéndole alargar su vida útil.
<b>Inversor</b>	Si	Sirve a convertir la corriente continua almacenada en la batería en corriente alterna, si es necesario para hacer funcionar algunas cargas.
<b>Cables, accesorios eléctricos</b>	No	Sirven a unir los diferentes componentes entre ellos. Incluyen elementos de protección (fusibles o disyuntores, puesta a tierra).
<b>Cargas</b>	No	Consumen la energía producida por la instalación aerogeneratriz. Existen aparatos funcionando con corriente continua y otros con corriente alterna.

Tabla 2.h: Componentes del sistema de control, almacenamiento y distribución de electricidad

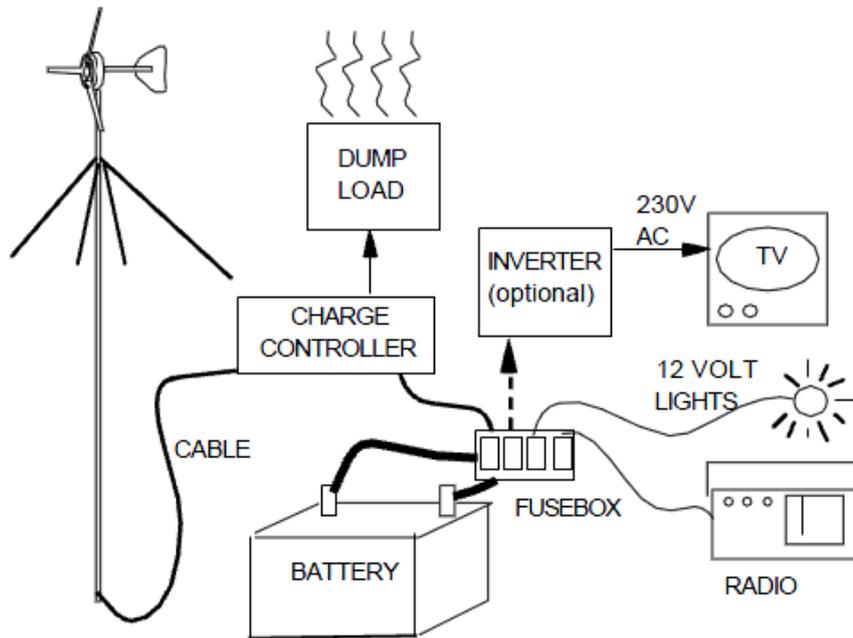


Ilustración 2.y: Típico sistema<sup>24</sup> de pequeña aerogeneración (9)

## 2.2. Definición de características

### 2.2.1. Problemática (9)

El viento es una fuente de energía inestable, que tiene mucha probabilidad de variar a lo largo del tiempo. Por tanto, dos tipos de problemas pueden ser encontrados:

- La velocidad de viento está baja y la producción de energía no satisfecha las necesidades del usuario. La batería se descargará y habrá que utilizar otras fuentes de energía.
- La energía producida por el MCA supera las necesidades y se ve disipada en forma de calor por el regulador, a menos que se hagan esfuerzos para utilizar esta energía excedente.

Para evitar estos tipos de decepciones u oportunidades no utilizadas, se debe diseñar el sistema mediante estimaciones de la demanda y de la producción ajustadas, y proporcionar estrategias para enfrentar la variación de la fuente energética.

En la práctica, velocidades de viento no son fácilmente predictibles. Por tanto la marcha la más razonable es de adquirir un sentido común del orden de magnitud del recurso eólico y de los niveles de consumos de los diferentes tipos de cargas. Además si eso se puede enseñar a los usuarios, se aumentarán las probabilidades de éxito de la implementación del sistema.

### 2.2.2. Medidas físicas

<sup>24</sup> Battery: batería; charge controller: regulador de carga; dump load: resistencia de disipación; inverter: inversor; fusebox: fusos o disyuntores; lights: focos.

### 2.2.2.1. Velocidad del viento

Es aconsejable conocer con precisión el perfil eólico de la zona donde se quiere instalar el microaerogenerador (cf. párrafos 1 y especialmente 1.3.2). El atlas eólico del Perú da una primera idea de las regiones interesantes para buscar recursos de viento, pero para aplicaciones domésticas los valores indicados por este atlas carecen de sentido. De hecho, este atlas fue elaborado con vistas satelitales y con los pocos medidores de las estaciones meteorológicas de los aeródromos de que se dispone el Perú, en alturas relativamente al nivel del suelo de 50 m, 80 m y 100 m.

Antes de implementar MCA en El Alumbre, Soluciones Prácticas instaló dos estaciones meteorológicas, arriba y abajo de la comunidad, pero solamente durante dos a tres meses, los con vientos más bajos. (8)

Factores que influyen en la velocidad del viento son:

- La rugosidad del terreno: este parámetro caracteriza la variación de velocidad del viento cerca del suelo debido a obstáculos como vegetación, edificaciones, etc., que causan turbulencias y disminuyen la velocidad del viento cerca del suelo. Superficies lisas, o sea con poca rugosidad, como superficies de agua o terrenos llanos, producen una variación de velocidad suave, al contrario de superficies de bosques, con edificaciones, o terrenos muy irregulares, donde la velocidad del viento por encima del suelo está retardada (es decir que el viento empieza a soplar sólo en una cierta altura relativa al suelo) y presenta una variación brusca.

Lo ideal es realizar las medidas de velocidades de viento a la altura a la que se va a colocar la turbina, pero si eso no resulta posible, lo que se suele hacer es realizar la medida a otra altura y luego extrapolar la velocidad. (26)

$$v_h = v_0 \frac{\ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h_0}{z_0}} \quad (1.1)$$

Donde:  $v_h$  es la velocidad del viento a la altura  $h$  [m.s<sup>-1</sup>]  
 $v_0$  es la velocidad del viento a la altura de medida  $h_0$  [m.s<sup>-1</sup>]  
 $z_0$  es el coeficiente de longitud de rugosidad [m]

El valor del coeficiente de longitud de rugosidad varía desde 0.0002 para la superficie del agua hasta 1.6 y más para ciudades grandes o bosques (véase la Ilustración A.b).

Otra manera de extrapolar la velocidad es mediante la ley exponencial de Hellmann:

$$v_h = v_0 \frac{h}{h_0}^a \quad (1.2)$$

Donde:  $a$  es el coeficiente de fricción o exponente de Hellmann [-]

El coeficiente de fricción suele variar entre 0.1 y 0.4. (26)

- El relieve del terreno: montañas, colinas, acantilados, etc., pueden generar una aumentación de la velocidad si la pendiente es suave o al contrario disminuir la misma si es fuerte o con bordes agudos, debido a la formación de turbulencia en este último caso. Además de reducir la velocidad del viento y por tanto la energía aprovechable por el aerogenerador, las turbulencias producen esfuerzos mecánicos de fatiga sobre la turbina, lo que reduce su vida útil.

Se recomienda hacer un estudio de recursos durante al menos un año – aun así los datos no están totalmente confiables, ya que no se puede saber si el año es típico o atípico –, con una pequeña estación meteorológica, incluyendo un anemómetro. La estación se debe colocar en la misma altura que un eventual aerogenerador, para que proporcione datos consistentes.



Ilustración 2.z: Anemómetro de cazoleta (27)

El anemómetro puede ser ultrasónico, de laser, de hélice o de cazoleta, que es el más utilizado.

En proyectos de microaerogeneradores, a veces no resulta posible hacer estudios precisos, mayormente por el costo de ellos. En tal caso se necesitaría buscar datos de estaciones cercanas si existen, hacer observaciones en el campo (orientación de las plantas, ramas), informarse sobre el comportamiento del viento en las diferentes estaciones del año hablando con los habitantes. También se puede observar la vegetación.

**Conocer la velocidad media no basta...**

Conocer la velocidad media en un lugar sólo da una indicación de conveniencia de lo mismo e invita a realizar estudios más detallados mediante una estación meteorológica. De hecho, un lugar con muchas variaciones en la intensidad del viento a lo largo del año puede tener la misma velocidad media que otro lugar con pocas variaciones de la misma. Pero en el primer caso, se podrán tener excesos o al revés faltas de energía en estaciones de fuerte viento o de bajo viento respectivamente.

Otra posibilidad si falta presupuesto es hacer medidas sólo en unos meses del año, que presentan la situación menos favorables, o sea con los vientos más débiles. Sin embargo, se deberá tomar en cuenta en el diseño la ocurrencia de vientos más fuertes en otras estaciones, si no habrá riesgo que el MCA se dañe con vientos demasiado fuertes para él.

### 2.2.2.2. Rosa de viento

El viento se caracteriza por su distribución de velocidad, pero hasta ahora sólo se ha hablado de los valores de velocidad, aunque el viento es un vector (o sea, tiene una dirección, un sentido y un valor). Otro parámetro que no hay que menospreciar es la dirección que toma el viento y los cambios en ella. (28)

Para el proyecto del Alumbre, Soluciones Prácticas no tuvo el presupuesto necesario para hacer estudios muy detallados; entonces no se ha conocido bien los cambios de dirección del viento,

Una rosa de viento es un gráfico polar representando la distribución del viento, mediante los 4 puntos cardinales y las otras 12 direcciones deducidas de los mismos. En cada sector de la rosa se muestra la frecuencia con que el viento sopla una dirección. Para determinar las direcciones que toma el viento se utiliza una veleta.

lo que generó fallas de aerogeneradores. En general, en las montañas varía 2 veces al día. (8)

En el contexto de aerogeneración, se puede modificar la rosa de viento para no representar esta frecuencia, sino la energía del viento en las diferentes direcciones. Por ello se suelen simbolizar en dos colores la frecuencia temporal y la fracción de energía del viento en cada sector de la rosa (cf. Ilustración 2.aa).

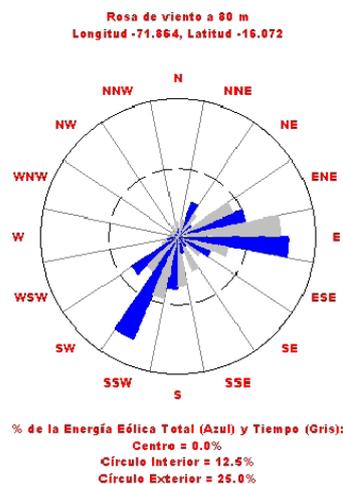


Ilustración 2.aa: Rosa de viento con representaciones de la frecuencia y de la energía eólica (29)

### 2.2.3. Colocación del aerogenerador

El viento es más fuerte en alturas más grandes, por tanto siempre se busca poner el MCA lo más alto posible. Se debe recordar que la variación del recurso eólico localmente puede ser muy fuerte.

Sin embargo, se debe vigilar que no esté demasiado lejos del lugar de utilización de la electricidad, porque al alargar los cables, las pérdidas de energía por efecto Joule estarán más importantes. Si no es posible reducir la longitud de los cables, se puede compensar por baterías de voltaje más elevado, que reducirá la intensidad de corriente necesaria y por tanto las pérdidas de energía por efecto Joule.

Es importante evitar edificios o vegetación cerca del MCA, ya que estos generan turbulencias en el recurso eólico. Es preferible poner el MCA más arriba de los edificios o vegetación, para evitar las turbulencias, que impactan una larga distancia debajo de los edificios o vegetación (cf. Ilustración 2.bb).

Por razones de seguridad, se debería evitar instalar el MCA arriba de zonas donde las personas viven, trabajan o circulan, ya que en caso de tormenta, piezas podrían caer, hasta la torre sí misma.

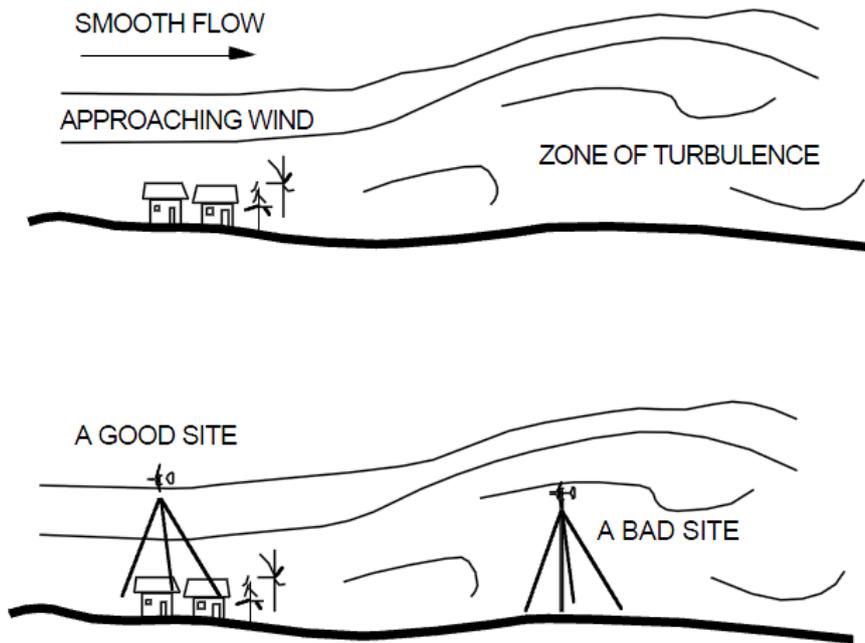


Ilustración 2.bb: Evitar las turbulencias generadas por edificios y vegetación<sup>25</sup> (9)

#### 2.2.4. Estimación de la energía generada

Si se ve muy difícil estimar con precisión la distribución de velocidades del viento – lo que de hecho no está raro –, se puede utilizar como regla general, para rápidas estimaciones: (9)

$$E_{elec}^{mes} \cong 0.09 \cdot D^2 \cdot v_{mes}^3 \cong 0.1 \cdot D^2 \cdot v_{mes}^3 \quad (2.3)$$

Donde:  $E_{elec}^{mes}$  es la energía eléctrica generada mensualmente [kWh]  
 $D$  es el diámetro del rotor [m]  
 $v_{mes}$  es la velocidad media mensual del viento [m/s]

Esta estimación proviene de la ecuación 1.4 y del número de horas en un mes (720). Se puede afinar si se conoce informaciones precisas sobre la eficiencia de las palas del rotor, la eficiencia del generador y la densidad del aire.

La tabla siguiente da estimaciones de la energía generada mensualmente para algunos valores de velocidad de viento en promedio mensual y para algunos diámetros de MCA.

Diámetro del rotor (m)	Velocidad media (m/s)			
	3	4	5	6
1	2	6	10	20
2	10	25	50	70
3	20	60	100	160
4	40	100	200	280
5	60	160	300	430

Tabla 2.i: Estimación de producción de energía mensual en kWh para varios tamaños de rotor y varias velocidades de

<sup>25</sup> Smooth flow: flujo suave; approaching wind: viento aproximándose; zone of turbulence: zona de turbulencia; a good site: un buen sitio; a bad site: un sitio malo.

### 2.2.5. Rotor

Las pérdidas de energía son altas para velocidades de viento elevadas, porque una corriente elevada circula en los cables; además la batería se cargará rápidamente y el excedente será disipado por el regulador. Potencia generada en velocidades de viento bajas es así de mayor beneficio para el usuario; por tanto mejor vale escoger un MCA de diámetro elevado que un MCA de alta potencia. (9)

### 2.2.6. Estimación de cargas

El almacenamiento de la energía producida por un MCA en baterías permite dissociar el momento de generación de energía del momento de consumo. Para estimar la potencia nominal que debe tener este MCA se realiza un balance energético del consumo, en Wh por día y luego en Wh por mes para poder comparar con el mes de viento más desfavorable, para asegurarse que se tendrá electricidad en todos los meses del año.

Para dimensionar la batería se debe realizar un balance de carga, en Ah/día, y definir el número de días de autonomía de la instalación en función de las características climáticas de la zona y del uso del sistema.

Primero hay que hacer una lista de las cargas que se van a utilizar. Para ello es más fácil utilizar tablas, diferenciando las cargas trabajando en CC de las trabajando en CA:

A	B	C	D	E	F	G	H
<b>Carga CC</b>	<b>Unidades (u.)</b>	<b>Potencia unitaria (W)</b>	<b>Potencia total (W)</b>	<b>Horas diarias de uso (h)</b>	<b>Energía / día (Wh)</b>	<b>Energía / mes (kWh)</b>	<b>Carga / día L<sub>CC</sub> (Ah)</b>
Tipo de carga: foco, TV, etc.	Nº de u. de la carga, ej. 3 focos	Potencia de 1 carga CC	(B)*(C)	Nº de horas de uso / día	(D)*(E)	(F)*30 /1000	(F) / V <sub>n</sub>
<b>TOTAL</b>					<b>Total Wh:</b> $\Sigma (D)*(E)$	<b>Total kWh</b>	<b>Total Ah</b>
<b>Pico de potencia</b>			$\Sigma (B)*(C)$				
<b>Potencia media</b>					$\Sigma (D)*(E) / 24$		

Tabla 2.j: Cálculo de la energía diaria, mensual, de la carga diaria, de la potencia media. Estimación del pico de potencia. Caso de las cargas en CC.

A	B	C	D	E	F	G	H
<b>Carga CA</b>	<b>Unidades (u.)</b>	<b>Potencia unitaria (W)</b>	<b>Potencia total (W)</b>	<b>Horas diarias de uso (h)</b>	<b>Energía / día (Wh)</b>	<b>Energía / mes (kWh)</b>	<b>Carga / día L<sub>CA</sub> (Ah)</b>
Tipo de carga: foco,	Nº de u. de la carga,	Potencia de 1 carga CA	(B)*(C)	Nº de horas de uso / día	(D)*(E)	(F)*30 /1000	(F) / V <sub>n</sub>

ej. 3 focos			
TV,			
etc.			
<b>TOTAL</b>	<b>Total Wh:</b> $\Sigma (D)*(E)$	<b>Total kWh</b>	<b>Total Ah</b>
<b>TOTAL con pérdidas del inversor (<math>\times 1/\eta_{inv}</math>)</b>	<b>Total Wh</b>	<b>Total kWh</b>	<b>Total Ah</b>
<b>Pico de potencia</b> $\Sigma (B)*(C)$			
<b>Potencia media</b>		$\Sigma (D)*(E) / 24$	

Tabla 2.k: Cálculo de la energía diaria, mensual, de la carga diaria, de la potencia media. Estimación del pico de potencia. Caso de las cargas en CA.

En la Tabla 2.j y Tabla 2.k,  $V_n$  es la tensión nominal de la batería (en general 12 V) y  $\eta_{inv}$  es la eficiencia del inversor, que es necesario añadir a la instalación para poder suministrar aparatos en corriente alterna.

Se calcula la potencia media dividiendo el consumo diario de energía (Wh) por las 24 horas del día. Este cálculo da una idea del tamaño del sistema que se podría instalar, más que el valor de energía consumida por día. Si el hogar utiliza cargas en corriente continua y cargas en corriente alterna, se combinan las dos tablas antes o después de este cálculo, a fines de determinar la potencia media total y la demanda total en energía.

En cuanto a la carga total, se determina de la siguiente manera:

$$L = L_{CC} + \frac{L_{CA}}{\eta_{inv}} \quad (2.4)$$

Se puede aumentar esta carga tomando un margen de seguridad del orden del 15%, que corresponderá a las pérdidas en los cableados y las conexiones, a las variaciones en los consumos previstos inicialmente, etc.

Para determinar con más precisión el pico de potencia, calculado en la Tabla 2.j como la suma de las potencias de cada aparato, es necesario hacer un balance hora por hora, para ver cuales aparatos funcionan en el mismo momento.

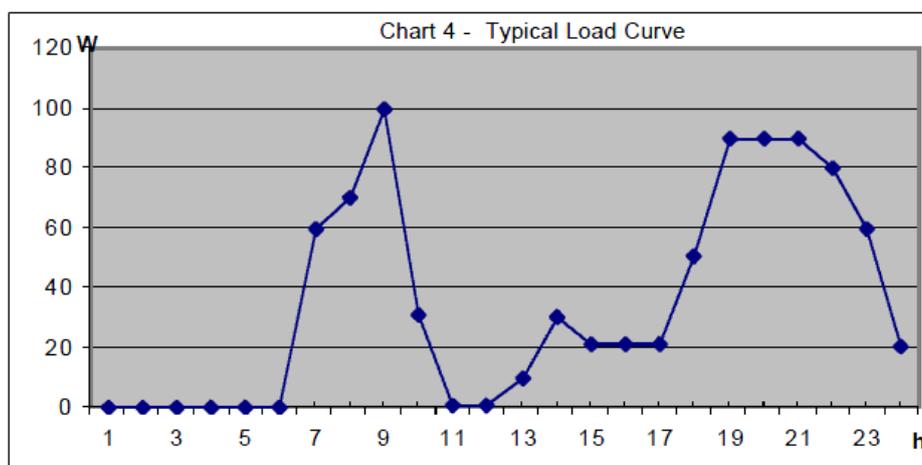


Ilustración 2.cc: Curva típica de la evolución de la potencia necesaria a lo largo del día (9)

### 2.2.7. Dimensionamiento del generador

---

Es poco probable que la entrega de potencia corresponda a la demanda en cada momento. Pero el uso de batería alisa este desajuste, permitiendo al usuario de tener electricidad almacenada cuando el viento estaba fuerte en los periodos de viento bajo o ausente. Entonces, si la potencia (la corriente) media entregada a la batería corresponde a la potencia media saliendo de la batería, el hogar debería ver sus necesidades satisfechas. O sea, el generador sólo necesita producir la potencia media, y no el pico de potencia – en la realidad, debería producir un poco más para compensar las pérdidas de energía en el sistema. (9)

Etapas para el diseño: (9)

- Estudio del recurso eólico (cf. §2.2.2)

En el caso ideal, primero se debe estudiar el recurso eólico local. Se determina para cada mes la velocidad media del viento; se identifican así los meses menos favorables y la capacidad de la batería podrá ser aumentada en consecuencia, u otras estrategias pensadas. En el ámbito del estudio del recurso, es importante también apuntar las velocidades máximas de ráfagas, para que el generador pueda ser reforzado si necesario.

- Estimación de la energía generada mensualmente (cf. §2.2.4), mediante la velocidad mensual del viento en promedio
- Comparar la disponibilidad de energía con las necesidades (cf. §2.2.6); tomar en cuenta las pérdidas de energía en el sistema. Ahora se puede evaluar si es viable utilizar un MCA.
- Determinar el número de días de autonomía de la batería. En general se escoge un valor entre 3 y 5 días, pero depende mucho de la capacidad de los usuarios a entender las problemáticas de ahorro de energía y de los problemas generados por una utilización excesiva.

Las estrategias en el caso que la disponibilidad de energía esté menor las necesidades son varias:

- Añadir un MCA
- Cambiar el tamaño del MCA, escogiendo uno de diámetro más largo
- Reducir las necesidades (reducir las cargas, o el número de hogares a suministrar)
- Añadir un MCA y compartirlos entre varios hogares (por ejemplo 2 MCAs para 3 hogares)
- Regular el uso de la electricidad.

### 2.2.8. Cálculo del tamaño de la batería

---

Para el dimensionamiento de la batería o del conjunto de baterías es necesario estimar el número de días de autonomía  $d$  requerido, que corresponderá con el número de días seguidos sin viento que pueden darse en el lugar de ubicación de la instalación. La capacidad  $C$  de la batería se expresa en Ah por:

$$C = \frac{L \cdot d}{p_d} \quad (2.5)$$

Con  $p_d$  la profundidad de descarga de la batería autorizada. Este parámetro depende del tipo de batería utilizado (véase el §2.1.2.3).

Para pequeños sistemas de aerogeneración, se suele tomar como valor de  $d$  entre 3 y 5 días. Un uso normal durante 3 a de 5 días corresponde a aproximadamente 7 días utilizando sólo las cargas esenciales, en caso de emergencia. (9)

Según el valor de capacidad encontrado, es posible utilizar varias baterías conectadas en paralelo. Por ejemplo, una capacidad de 200 Ah puede ser alcanzada mediante dos baterías de 100 Ah cada una, conectadas en paralelo.

### 2.2.9. Selección del inversor (en caso sea necesario)

---

Si se ve necesario suministrar energía eléctrica en corriente alterna (CA), habrá que equipar la instalación de un inversor CC/CA (invirtiendo la corriente continua en corriente alterna).

Para conocer la potencia nominal del inversor a instalar, ha de hacer una lista de las cargas que trabajarán en CA y de adicionar sus potencias (W); se escogerá la potencia nominal del inversor como ligeramente superior a ésta, pero la más cercana posible. No conviene sobredimensionarla, porque el inversor es menos eficiente cuando trabaja a un porcentaje bajo de su capacidad. (24)

La tensión de entrada del inversor debe ser igual a la tensión nominal del sistema. En cuanto a las características de salida, deben corresponder a lo indicado sobre las cargas (una tensión de 220/230 V y una frecuencia de 50 o 60 Hz son comunes).

Un inversor consume una parte de la electricidad que invierte, lo que es caracterizado por su eficiencia o rendimiento. La eficiencia del inversor  $\eta_{inv}$  varía entre 0.8 y 0.95, el valor de 0.9 siendo considerado como una buena eficiencia. Además, la mayoría de los inversores gastan energía también cuando no están funcionando; pero en general los inversores adecuados a pequeñas instalaciones fotovoltaicas son equipados de un interruptor que permite apagarlos. Existen también aparatos que combinan la función del regulador con la del inversor.

### 2.2.10. Caso de un MCA multifamiliar

---

En ubicaciones donde el viento es fuerte y las viviendas cercanas, puede tener sentido compartir un MCA entre varios hogares, así que un banco de baterías. El dimensionamiento del sistema es similar al caso unifamiliar.

Si el sistema es muy sencillo, sin regulador de carga automático, se deben buscar estrategias para que los hogares no usen excesivamente la electricidad, lo que podría llegar a conflictos. Existen varias opciones para el suministro de energía, en vez de utilizar un banco de baterías común:

- Baterías individuales para cada hogar: a cargar en rotación. Se debe construir un sistema de rotación inteligente, lo que puede resultar un poco complicado, ya que la variación del viento hace difícil evaluar el tiempo de carga de una batería.
- Carga de batería a pagar: cada hogar lleva su batería a un punto de carga y paga una cuota para la carga. Cada hogar pagaría exactamente por lo que consume, pero la desventaja es que las baterías estarían sometidas a descargas más profundas que de costumbre, acortando su vida útil.
- Desconectores de bajo voltaje: cortan la entrega de corriente desde la batería si la tensión entre sus bornes se encuentra debajo de cierto valor, lo que significa que la batería está descargada o en vías de descargarse. Evita descargas profundas.

- Reguladores de carga electrónicos: para regular la intensidad entregada a cada hogar, asegurándose que se queda entre dos extremos.

### 2.2.11. Resumen y ejemplos de modelos

La colocación del MCA se debe escoger con cuidado, buscando los vientos suaves y constantes. Los edificios y la vegetación generan turbulencias.

La determinación del modelo de MCA a utilizar (y la pertinencia de la instalación de tal sistema) se hace del modo siguiente:

- Estudiar el recurso de viento en el lugar. Se recomienda, dentro de lo posible, determinar la distribución de velocidades del viento y sus direcciones. Luego, determinar el promedio mensual de la velocidad, así que anotar los picos de velocidad debidos a ráfagas. Con la identificación de los meses peores y las velocidades puntas se puede respectivamente adecuar la capacidad de las baterías y reforzar el MCA para que aguante los picos de velocidad.
- Estimación de la energía generada por mes en el lugar mediante una aproximación de la ecuación de generación de potencia.
- Estimación de las necesidades de energía del o de los hogar(es), añadiendo en el caso de cargas CA las pérdidas de energía debidas al inversor.
- Comparación de las necesidades con la energía disponible. Elaboración de estrategias en caso que la comparación sea desfavorable. Evaluación de la viabilidad del proyecto.

Estimar el número de días de autonomía de la batería y dimensionarla tomando en cuenta este parámetro, el límite de descarga y las cargas.

Modelo de MCA y/o componente	Potencia nominal	Precio de venta / Costos de fabricación / Costos de instalación...	Valor del costo o precio
<b>IT-PE-100 de Soluciones Prácticas</b>	100 W	Costos de fabricación del conjunto aerogenerador	US\$ 440
<b>VÉLTER D de SOLENER</b>	500 W	Precio de venta sin regulador, ni torre ni instalación	2300€ + IVA
<b>Regulador desarrollado por SOLENER</b>		Precio de venta	1250 € + IVA
<b>SP-500 de Soluciones Prácticas</b>	500 W	Costos de fabricación	S/.3154.3
<b>ATR-500 de WAIRA</b>	500 W	Costos de fabricación del conjunto aerogenerador	S/.4234.51
		Costos incluyendo fabricación de aerogenerador, batería, regulador, inversor, torre, instalación...	≈ S/.11300
		Precio de venta (con instalación)	≈ S/.15000
<b>WindAid 2000XF</b>	2 kW	Precio de venta (con instalación)	US\$ 9240
		Costo de mantenimiento	US\$ 40 / año
		Costo de reemplazo de las 2 baterías	US\$ 290

cada 4 años

**Tabla 2.I: Ejemplos de modelos de MCAs y otros componentes, con costos o precios de venta (9) (10) (11)**

### 2.3. Normas

---

Existen normas internacionales, pero el mercado peruano acepta muchas fabricaciones caseras, es decir sin certificado. Se puede decir que hay un “vacío legal” en el ámbito de las instalaciones aisladas. (11)

### 3. Instalación

---

La instalación del MCA debe hacerse en un lugar desprovisto de obstáculos como arboles o casas, los cuales generan distorsiones en el flujo de aire y turbulencias y así afectan el rendimiento del sistema.

#### 3.1. Torre soporte

---

Para instalar el MCA en la altura de diseño (la cual depende de las características orográficas, de velocidad del viento y de las vías de acceso, entre otros (7)), se requiere diseñar y construir una estructura que soporte la máquina, llamada torre soporte. Este elemento es importante en cuanto al método de elevación y fijación a la altura adecuada, especialmente cuando se trata de piezas grandes, o en el caso de traslados difíciles por la sierra, selva o desierto.

La mayoría de los instaladores fabrican sus propias torres soporte, pero existe también un mercado de ellas. La altura de las torres soporte varía de 6 a 40 metros. (11)

En el caso de aerogeneradores muy pequeños y por tanto de alturas de 6 a 8 m, basta usar como torre un tubo galvanizado estándar de 2.5 a 3" con espesuras de 4 mm. Para mayores alturas se ve necesario preparar estructuras metálicas más robustas, de forma triangular, cónica u otra. (7)



**Ilustración 3.a: IT-PE-100 con un tubo galvanizado como torre soporte (8)**



**Ilustración 3.b: IT-PE-100 en mayor altura, con una torre más robusta (8)**



**Ilustración 3.c: SP-500 con torre más robusta, hecha de varios tubos (8)**

Según las condiciones de acceso al lugar de instalación y/o los costos de transporte, se podrá traer la torre soporte o entera o en varias piezas a ensamblar in situ.

Para sujetar la torre al suelo se suele cimentarla. La cimentación de los anclajes para los tensores de la torre se debe hacer al menos cuatro días antes del montaje del sistema de aerogeneración para que alcance su resistencia óptima. Para una buena estabilidad se colocan los anclajes en 3 puntos equidistantes (cf. Ilustración 3.d).

Material	Cantidad para el IT-PE-100
Cemento	2 bolsas de 50 kg
Hormigón y ripio	
Piedras	Piedras medianas
Agua	

Tabla 3.a: Material para la cimentación de la torre soporte

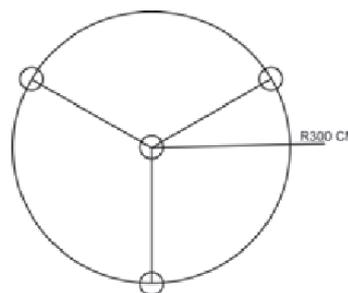


Ilustración 3.d: Disposición de los anclajes, IT-PE-100 (7)

Para el izamiento del poste se necesitan varias personas, al menos cinco, de acuerdo con el tamaño de la estructura a izar. Se deberán preparar mecanismos de ayuda y habrá siempre que tomar en cuenta la seguridad de las personas. (7) Por ejemplo, en el caso del MCA de Soluciones Prácticas IT-PE-100, se preparan entonces dos apoyos de tipo T con dos maderas y clavos, como en la Ilustración 3.f.

Al hacer esta operación, siempre se debe cuidar la seguridad de los constructores y de las personas e instalaciones alrededor.

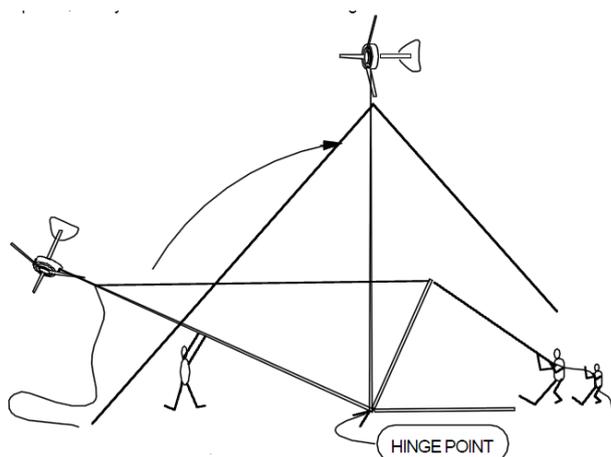


Ilustración 3.e: Izamiento<sup>26</sup> de una torre sencilla (9)



Ilustración 3.f: Izamiento de un IT-PE-100 en el Perú mediante postes y cuerdas (9)

## 3.2. Conexión eléctrica

Todos los conductores eléctricos que salen del eje del generador se deben proteger mediante una tubería o manguera de plástico, que estará por parte insertada al eje. De hecho, por los numerosos cambios de dirección del viento y por tanto de movimiento del poste, los conductores podrían rozar con el filo de tubo de la torre y así ir generando alguna avería. (7)

Si no se utiliza un regulador eólico con función de rectificación de la señal eléctrica proveniente del generador, se deberá instalar una caja de diodos rectificadores. Ésta puede estar ubicada en la torre. De todo modo, las conexiones a la caja se deberán realizar después de haber izado el poste.

<sup>26</sup> Hinge point: punto de bisagra

Para conectar los tres cables que salen del generador a la caja de diodos, habrá que respetar los colores de cables y poner cinta aislante en los empalmes.

- Cada diodo tiene 4 terminales, incluyendo dos CA, uno positivo y uno negativo (cf. Ilustración 3.g); se conectan dos líneas que vienen del generador a los terminales AC de uno de los diodos, que están opuestos entre sí.
- La tercera línea del generador viene conectarse a una borne AC del otro diodo.
- Los terminales positivos de los diodos se unen mediante un cable que va a la borne positiva de la batería, vía la bornera.
- Lo mismo sucede para los terminales negativos de los diodos con la borne negativa de la batería.

### 3.3. Participación de los usuarios

Se recomienda involucrar a los usuarios en la instalación de su sistema. Participan mediante el aporte de material (cemento, arena, cajas de madera para la batería y el inversor), la compra de materiales tipo cables y la mano de obra en el izamiento de la torre, por ejemplo. (8)

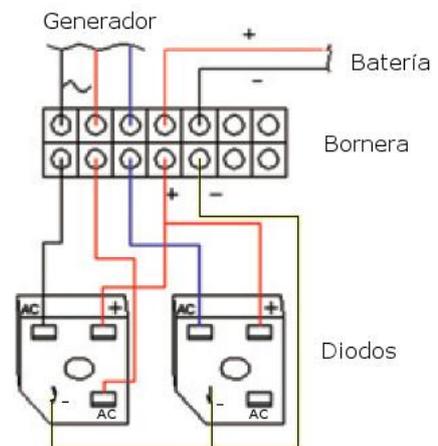


Ilustración 3.g: Conexión de conductores a diodos (7)

## 4. Operación, mantenimiento y reemplazo

---

Es aconsejable dejar a la disposición de los usuarios un manual de operación y mantenimiento, que les recuerde la significación de las indicaciones del regulador, el funcionamiento del inversor, etc., y las tareas sencillas de mantenimiento.

### 4.1. Operación

---

Las cargas alimentadas por un MCA son cargas de pequeña potencia (cf. §2.1.2.6). Pero aún sí, se debe educar al usuario a la cultura de ahorro de energía, y explicarle que en caso de rarefacción del recurso de energía (o sea, que el viento baje o pare), no tendrá mucha energía y tendrá que ahorrar. Para ahorrar debe limitar el uso de aparatos tipo TV o DVD.

Aparatos tipo licuadora, refrigeradora, cocina, lavadora, etc., tienen potencias demasiado elevadas para ser atendidos por un MCA de tipo IT-PE-100 (potencia nominal 100 W), pero un MCA de potencia nominal 500 W puede servir un aparato de este tipo durante unas horas.

En El Alumbre, la posta de salud recibe su electricidad de un MCA de 500 W, equipado de un inversor, que le permite prender una pequeña refrigeradora a vacunas durante 3 a 5 horas por día, hasta el punto de congelación. (8)

No se debe dejar el generador girar y al mismo tiempo desconectarlo del sistema de almacenamiento de electricidad. De hecho, mientras que la tensión de una batería de 12 V no es peligrosa, el generador girando a alta velocidad produce una tensión mucho más elevada, por ejemplo 50 V. El riesgo de choco eléctrico es real. (12)

A veces el sistema de regulación es parcialmente manual, como en el caso del IT-PE-100. Cuando la batería está cargada (lo que es señalado por una LED del regulador electrónico), el usuario debe, amarrar el MCA mediante una cuerda, para que no corriente adicional sea producida y entregada a la batería, causando una sobrecarga de la misma. Lo mismo vale para el sistema de frenado, en caso de fuerte viento, los usuarios deben bloquear el MCA. (8)

### 4.2. Mantenimiento

---

#### 4.2.1. Mantenimiento del aerogenerador

---

De manera general, se debe tener cuidado con la posible oxidación de las diferentes piezas que componen el aerogenerador. Los MCAs instalados en la costa tienen más problemas de corrosión y desgaste por la sal y la arena.

Si el aparato es simple, el mantenimiento es sencillo. ¡Sin embargo, la capacitación al mantenimiento no se puede dejar de lado! Son cosas sencillas pero que se deben hacer correctamente para alargar la vida útil del aerogenerador: por ejemplo, utilizar el bueno tipo de grasa para lubricar las piezas, dar el par de apriete requerido y no el máximo que se puede, utilizar los materiales de reposición adecuados, etc. (11)

Esto constituye tareas sencillas pero los usuarios deben ser conscientes de que el hacerlo bien es primordial para alargar la vida útil del sistema. Por eso, se puede ver preferible encomendar el mantenimiento a gente especializada y no a los usuarios, a menos que estén muy bien capacitados. En los proyectos de Soluciones Prácticas, es una persona de la ONG que lo hace, mientras que los usuarios tienen que avisar al operador capacitado cuando ocurre un problema. (8)

- Lubricación semestral de todas las piezas giratorias y móviles
- Cambio de los rodamientos cada dos años
- Repintado de toda la estructura cada dos años
- Desmontaje y limpieza anuales de la veleta y del rotor

#### 4.2.2. Mantenimiento del regulador de carga

El regulador necesita poco mantenimiento, pero es importante que funcione bien, porque protege la batería, alargando su vida útil. (24) (30)

- Se debe observar visualmente del estado del regulador y su funcionamiento. Con un voltímetro y amperímetro se pueden verificar los valores de tensión y de intensidad de corriente, que dan un índice del comportamiento de la instalación. Si detecta ruidos anormales, contacte al personal especializado.
- Mantenga el controlador de carga colocado en posición correcta, lugar limpio, seco y protegido de los rayos solares.
- Verifique que las conexiones y el cableado estén correctos y bien apretados.
- Chequee que el fusible de entrada esté en buen estado.

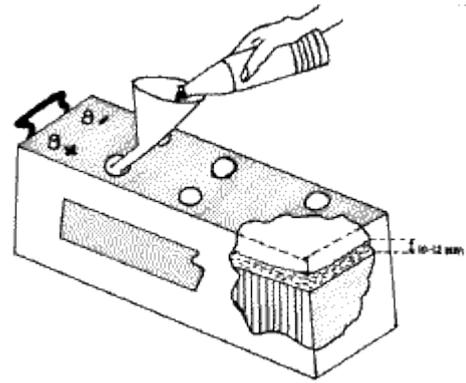
#### 4.2.3. Mantenimiento de la batería

La batería es el componente de la instalación que requiere más atención. Su duración depende de manera crítica de su manejo.

Primero se debe verificar que la batería esté en un local ventilado y que se encuentra protegida de los rayos solares. Además se debe cerciorar de que la estructura de soporte de la batería esté bien segura y en buen estado. (30)

En cuanto al electrólito, si el modelo de batería instalado es libre de mantenimiento, normalmente no hay ninguna tarea que hacer.

Pero si se trata de una batería abierta, se debe una a dos veces al año añadir agua destilada para renovar el electrolito; el nivel de lo mismo se debe mantener entre las marcas “mínimo” y “máximo” indicadas, y si no hay estas marcas, el nivel de electrolito adecuado es entre 10 y 12 mm por encima del protector de separadores. Nunca se debe rellenar con ácido sulfúrico sólo, sino con agua destilada o también agua preparada, que es una mezcla en proporciones iguales de agua destilada con ácido sulfúrico (15). Como último recurso se puede también utilizar agua de lluvia, pero esa no debe entrar en contacto con metales, para que no adquiera impurezas; así, por ejemplo se puede recoger por un techo de tejas cerámicas o por una lona impermeable. Además, si la ubicación del MCA está sujeta a lluvias ácidas, no es recomendable usar agua de lluvia.



**Ilustración 4.a: Añadido de agua destilada para mantener el nivel de electrolito (30)**

Si se dispone de un densímetro, se puede medir la densidad del electrolito, que debe ser de  $1240 \pm 0.01$  g/L a  $20^{\circ}\text{C}$  cuando la batería está cargada.

Al realizar estas operaciones se comprueba el estado de los bornes de la batería, que se limpian de posibles depósitos de sulfato. Los bornes deben estar bien apretados. Además se recomienda limpiar la cubierta superior de la batería y cubrir de vaselina neutra, o grasa antioxidante, todas las conexiones, para evitar la sulfatación. (24) (30)

- Causas frecuentes de sulfatación de una batería: (24)
  - Dejarla descargada durante mucho tiempo,
  - Añadir ácido puro al electrolito,
  - Sobrecargas demasiado frecuentes,
  - Haber esperado demasiado antes de añadir agua destilada al electrolito,
  - Trasvase del electrolito de unos vasos a otros.
- Síntomas de sulfatación de un elemento de la batería: (24)
  - El densímetro registra siempre una densidad baja del electrolito, a pesar de que el elemento siempre se somete a la misma carga que los otros elementos,
  - La tensión es inferior a la de los demás elementos durante la descarga y superior durante la carga,
  - Es imposible cargar la batería a toda su capacidad,
  - Las dos placas, positiva y negativa, tienen un color claro,
  - En casos extremos, uno de los terminales sobresale más de lo normal debido a la deformación de las placas.
- Riesgos y precauciones al manipular la batería: (30)
  - Riesgos del electrolito: el electrolito es ácido diluido, por tanto puede causar irritaciones, incluso quemaduras, en la piel y los ojos. Si el electrolito entra en contacto con los ojos, se deben enjuagar inmediatamente con abundante agua durante un minuto, manteniendo los ojos abiertos. Si el contacto es con la piel, lave inmediatamente con abundante agua la zona afectada. En ambos casos,

después de esta primera acción neutralizadora, consulte rápidamente un médico.

- Riesgos eléctricos: la batería puede presentar riesgos de cortocircuitos, que generarían alto voltaje. Se recomienda al manipularla observar las siguientes reglas:
  - Quítese relojes, anillos, cadenas u otros objetos metálicos de adorno personal que pudieran entrar en contacto accidentalmente con los bornes de la batería de acumulación.
  - Siempre que las necesite, use herramientas con mangos aislados eléctricamente.
- Riesgos de incendio: las baterías presentan riesgos de explosión y por consiguiente de incendio, debido a que generan hidrógeno. Se recomienda lo siguiente:
  - Proporcione una buena ventilación en el lugar de ubicación de la batería de acumulación para evitar acumulación de gases explosivos.
  - No fume en el área donde está ubicada la batería de acumulación ni prenda chispas para observar el nivel del electrolito.
  - Mantenga el área de la batería de acumulación fuera del alcance de llamas, chispas y cualquier otra fuente que pueda provocar incendio
  - No provoque chispas poniendo en cortocircuito la batería para comprobar su estado de carga, pues también puede provocar explosión.

#### 4.2.4. Mantenimiento del inversor

---

- Verifique que el área de ubicación del inversor se mantenga limpia, seca y bien ventilada.
- Asegúrese de que el inversor esté protegido de los rayos solares.
- Compruebe que el inversor funciona adecuadamente y que no se producen ruidos extraños dentro de él. En caso de que la operación sea defectuosa o no funcione, contacte al personal especializado.

#### 4.2.5. Mantenimiento de equipos consumidores y cableados

---

- De manera general se debe comprobar que no haya terminales flojos ni rotos, que las conexiones estén bien apretadas y que los conductores se hallen en buenas condiciones. Verifique que todos los empalmes y conexiones estén fuertemente apretados para evitar falsos contactos, y protegidos adecuadamente con cinta aislante. (30)
- El mantenimiento de los equipos consumidores (radios, televisores, refrigeradoras, computadoras, etc.), es el mismo que se le hace a éstos cuando funcionan conectados a la red nacional. (30)
- En el caso de la refrigeradora, se ubica en un lugar bien ventilado para garantizar un uso más eficiente y por tanto no debe cambiarlo de lugar sin la consulta del especialista.

- Se deben limpiar los focos si se encuentran en un entorno donde hay mucho polvo (cocina, granja...) para que la luz que proporcionan no sea velada (17).

Si un componente del sistema no funciona adecuadamente y su solución está fuera de las acciones que se han establecido en el manual básico, el usuario debe contactar con el personal especializado. No debe acudir a personas no autorizadas ni tratar sí mismo de solucionar el problema. Con esta medida se evitan accidentes y daños a la instalación. (30)

#### 4.2.6. Otras recomendaciones (30)

---

- Desconecte los equipos electrodomésticos en los días de tormentas eléctricas fuertes y ciclones para evitar que una descarga atmosférica pueda averiarlos.
- No conecte al sistema equipos electrodomésticos o de otro tipo que no hayan sido considerados en el diseño, sin consultar a los especialistas, ya que una sobrecarga por consumo excesivo puede provocar su mal funcionamiento.
- No permita que otros usuarios se conecten a su instalación (no hacer tendederas).
- No conecte equipos de potencia superior a la del inversor CC/CA, pues esta sobrecarga puede dañarlo.
- Almacene el agua destilada en recipientes plásticos o de cristal; siempre que vaya a añadir agua destilada a la batería de acumulación, use también embudo de plástico o cristal (en ningún caso emplee recipientes metálicos).
- Una vía para recolectar agua destilada es en los días de lluvia. Una vez que comience a llover, espere de 10 a 15 minutos y luego coloque un recipiente abierto, de plástico o cristal, al aire libre. Nunca recolecte agua de techos, canaletas y otros medios.
- No utilice, en sustitución del agua destilada para rellenar la batería de acumulación, agua de río, hervida u otro tipo que no sea la recomendada, ya que esto daña la vida útil de la batería de acumulación.
- Fíjese regularmente en los indicadores lumínicos del controlador de carga y en caso de notar que alguno de ellos no enciende, contacte inmediatamente al personal especializado.
- Si alguna lámpara no enciende y el tubo fluorescente no está fundido ni defectuoso, revise tanto el fusible (si lo tiene) como el interruptor. Si alguno está defectuoso, reemplácelo por otro.

Recuerde siempre que en los MCAs, como la energía es limitada, se hace mucho más necesario el ahorro al máximo. Por tanto, no mantenga luces o equipos encendidos innecesariamente.

#### 4.3. Reemplazo

---

La vida útil es un punto de consideración importante, debido a las largas distancias en el Perú, que complican la llegada de técnicos para asistencia y el transporte del sistema o de sus componentes. Supuestamente, con mantenimiento adecuado, la duración de un MCA es de 20 años.

Sin embargo, si el sistema de regulación y frenado no está adecuado, o si el recurso eólico ha sido mal evaluado (descuidando los vientos fuertes o turbulentos), el MCA puede alcanzar velocidades de giro demasiado elevadas, lo que:

- Aumenta fuertemente la intensidad de la corriente generada, ocasionando daños eléctricos (quema de aparatos)
- Llega a la rotura mecánica de algunos elementos del aerogenerador (como se ve en las ilustraciones siguientes).

En cuanto a las piezas sueltas, debe ser posible crear un sistema de recuperación de piezas.

La duración de la batería depende mucho del tipo (cf. §2.1.2.3.1); puede variar entre 2 años para baterías de arranque y 8 a 10 años para unos tipos de baterías estacionarias. En el Perú, no hay ningún sistema de reciclaje para las baterías en fin de vida. Sólo se podría organizar que las baterías estuvieran llevadas a un centro técnico. Ahora en los proyectos de gran tamaño se pide a los fabricantes que recomienden algo para las baterías en fin de vida (22). Al comprar de una nueva batería, si es de arranque, se debe verificar que realmente sea una batería nueva, y no una usada vendida como nueva, como lo señaló un usuario en la isla de Taquile (15).

Un inversor dura al menos 5 años.

Los fusibles deben ser reemplazados cuando se queman. En el terreno se constató que varias veces eso no era el caso; pero si ocurre otra vez una sobrecorriente, sin fusibles ella dañará los componentes de la instalación.



**Ilustración 4.b: Elementos de palas rotas (8)**



**Ilustración 4.c: Cono malogrado (8)**



**Ilustración 4.d: Veleta corroda (8)**



**Ilustración 4.e: Torre soporte rota (8)**

## Conclusión

---

Un microaerogenerador es un sistema autónomo de generación de electricidad, que utiliza la energía cinética del viento para producir energía eléctrica que será almacenada en baterías para una utilización simultánea o diferida.

Donde el recurso eólico es favorable, o sea donde el viento sopla todo el año sin muchas turbulencias y en velocidades superiores a 3 o 4 m/s, presenta una buena alternativa a combustibles tradicionales. Un punto delicado es justamente la evaluación del recurso eólico, pues es poco conocido en el Perú y otros países, y que los datos disponibles no son de mucha ayuda en el ámbito de pequeños aerogeneradores, proporcionando datos de viento en alturas más elevadas que la altura típica de un MCA. Por tanto se recomienda realizar durante un año un estudio del recurso eólico local, mediante pequeñas estaciones con anemómetros. Pero a veces eso resulta difícil de realizar por algunas razones, o demasiado costoso. En cuanto a eso, en este documento se da consejos para realizar una estimación grosera del potencial de generación de energía a partir del viento local. Pero lo más importante, si se ve con un estudio menos profundizado que el recurso eólico presenta características favorables, es de instalar un sistema que sea robusto y eficaz, y que así proporcione energía a los pobladores.

Las características que debe tener un MCA en un marco de electrificación rural en países en vías de desarrollo, como el Perú, son robustez, sencillez, fiabilidad y reproductividad; eso se consigue más con experiencia y con estimación aproximada de parámetros que mediante estudios y simulaciones muy precisos. Un punto clave también es la vida útil y la frecuencia de reparaciones en taller, porque en un país como el Perú en lo cual las distancias son largas, y como de todo modo estos sistemas son asignados a estar instalados en zonas de acceso difícil, el transporte resulta largo, dificultoso y costoso. Esta tecnología es relativamente nueva y por tanto todavía en fase de desarrollo y de aprendizaje, entonces se va mejorando. La capacitación de los usuarios al uso y al mantenimiento es muy importante, así que la formación de técnicos, ya que hay poco especialistas.

Mediante el suministro de electricidad vía baterías, los usuarios tienen una iluminación de mejor calidad, pueden utilizar aparatos de pequeña potencia como radios, TVs, DVDs o cargadores de celulares. Además si el sistema tiene dimensiones suficientes para ello, pueden aprovechar esta energía para crear nuevas posibilidades de ingresos para ellos: cargas de las baterías de sus vecinos (lo más fácil de implementar), sala de televisión, pequeños talleres, juguería, peluquería, etc.

## Bibliografía

---

1. Parque Eólico Experimental Sotavento. [En línea]  
[http://www.sotaventogalicia.com/area\\_tecnica/tecnologias\\_funcionamiento.php](http://www.sotaventogalicia.com/area_tecnica/tecnologias_funcionamiento.php).
2. **Danish Windpower Industry Association.** Danish Windpower Industry Association - windpower.org. [En línea] <http://guidedtour.windpower.org/es/tour/wres/index.htm>.
3. [En línea] [http://freresguizmo.free.fr/eolienne/index.php?seiten=Principe\\_pale](http://freresguizmo.free.fr/eolienne/index.php?seiten=Principe_pale).
4. [En línea] [http://eolienne.f4jr.org/eolienne\\_etude\\_theorique](http://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique).
5. [En línea] <http://www.windstuffnow.com/main/wind.htm>.
6. **Cuesta Santianes, María José, Pérez Martínez, Marta y Cabrera Jiménez, Juan Antonio.** *Aerogeneradores de potencia inferior a 100 kW*. Madrid : Ministerio de Ciencia e Innovación, julio 2008.
7. **Chiroque, José y Dávila, Celso.** *Microaerogenerador IT-PE-100 para electrificación rural*. Lima : Soluciones Prácticas - ITDG, 2008.
8. **Prácticas, Soluciones.** *Visita del proyecto de microaerogeneradores en El Alumbre*. Cajamarca, 16 de marzo de 2011.
9. **Dunnett, Simon, Khennas, Smail y Piggott, Hugh.** *Small wind systems for battery charging*. Bourton on Dunsmore : ITDG, July 2001.
10. **de Lucas Cabañas, Gerardo.** *Cooperación al desarrollo: Transferencia de tecnología eólica en la fabricación de micro-aerogeneradores mediante tecnologías apropiadas en regiones rurales andinas del Perú*. Leganés : Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
11. —. *Entrevista con G. de Lucas Cabañas, ingeniería WAIRA Energía SAC*. Lima, 3 de febrero de 2011.
12. **Piggott, Hugh.** *The Permanent Magnet Generator (PMG): a manual for manufacturers and developers*. s.l. : ITDG, June 2001.
13. **Doménech Lega, Bruno.** *Modelo para el diseño de proyectos de electrificación rural con consideraciones técnicas y sociales*. Barcelona : s.n., 2010.
14. **Forget, Astrid.** *Manual de diseño de sistemas fotovoltaicos aislados*. Lima : Microsol, 2011.
15. **Huaraco, Jorge.** *Visita de instalaciones fotovoltaicas en el lago Titicaca, incluso el proyecto del CER-UNI*. Puno, 20-22 de marzo de 2011.
16. **Prácticas, Soluciones.** *Visita del proyecto de Soluciones Prácticas en Alto Perú*. Cajamarca, 15 de marzo de 2011.
17. **Olivares Magill, Jessica.** *Visita del proyecto Luz en Casa - Piloto fotovoltaico de Perú Microenergía*. Cajamarca, 17 de marzo de 2011.
18. **SmartGauge Electronics.** SmartGauge. *Peukert's Equation*. [En línea] 2 de abril de 2008.  
<http://www.smartgauge.co.uk/peukert2.html>.
19. **Horn, Manfred.** Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería. *¿Qué baterías usar en sistemas fotovoltaicos domiciliarios?* [En línea] 1997. <http://fc.uni.edu.pe/solar/baterias.html>.
20. —. *Entrevista con M. Horn, profesor de física en la Facultad de Ciencias de la UNI y miembro fundador del CER-UNI*. Lima, 8 de febrero de 2011.
21. **ENERGEX.** ENERGEX. *Efecto de temperatura en baterías tipo plomo-ácido*. [En línea]  
<http://www.energex.com.co/pdf/temperaturabaterias.pdf>.
22. **Espinoza, Rafael.** *Entrevista con R. Espinoza, director del CER-UNI*. Lima, 31 de enero de 2011.

23. **Green Empowerment, ITDG.** *Manual de capacitación - sistemas fotovoltaicos.* Cajamarca : s.n., junio 2005.
24. **SolarTronic.** SolarTronic. *Preguntas frecuentes.* [En línea] [http://www.solartronic.com/Ayuda/Preguntas\\_Frecuentes/#Preg6](http://www.solartronic.com/Ayuda/Preguntas_Frecuentes/#Preg6).
25. **Pearce, Joshua M., Hernandez, Victor y Seitz, Julia.** Appropedia. *Energía solar fotovoltaica.* [En línea] 2010. [http://www.appropedia.org/Energ%C3%ADa\\_solar\\_fotovoltaica](http://www.appropedia.org/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica).
26. **Bañuelos-Ruedas, F., y otros.** *Análisis y validación de metodología usada para la obtención de perfiles de velocidad de viento.* México : s.n.
27. **Bayod Rújula, Ángel Antonio, y otros.** *Guía de energías renovables aplicadas a las PyMEs.* s.l. : CEPyME ARAGÓN.
28. **Programa de Energía, Infraestructura y Servicios Básicos - ENISER.** *Ficha Técnica: Fundamentos de la Energía Eólica.* Lima : Soluciones Prácticas.
29. **DFC/DGER/MEM.** *FONER - Atlas eólico del Perú.* Lima : DFC/DGER/MEM, 2008.
30. **Ramos Heredia, Ruben, Camejo Cuán, José y Márquez Montoya, Soe.** CubaSolar. *Mantenimiento de sistemas solares fotovoltaicos.* [En línea] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo02.htm>.
31. **Chow, Jack T.** *Assessment of Solar Home Systems (SHS) for Isolated Rural Communities in Vanuatu Using Project Lifecycle / Sustainability Framework.* Houghton : Michigan Technological University, 2010.
32. **AREBOR Énergie.** AREBOR Énergie. *Encyclopédie.* [En línea] <http://www.arebor-energie.fr/encyclopedie/index.php/Accueil>.

# Anexos

## A. Mapa eólico del Perú

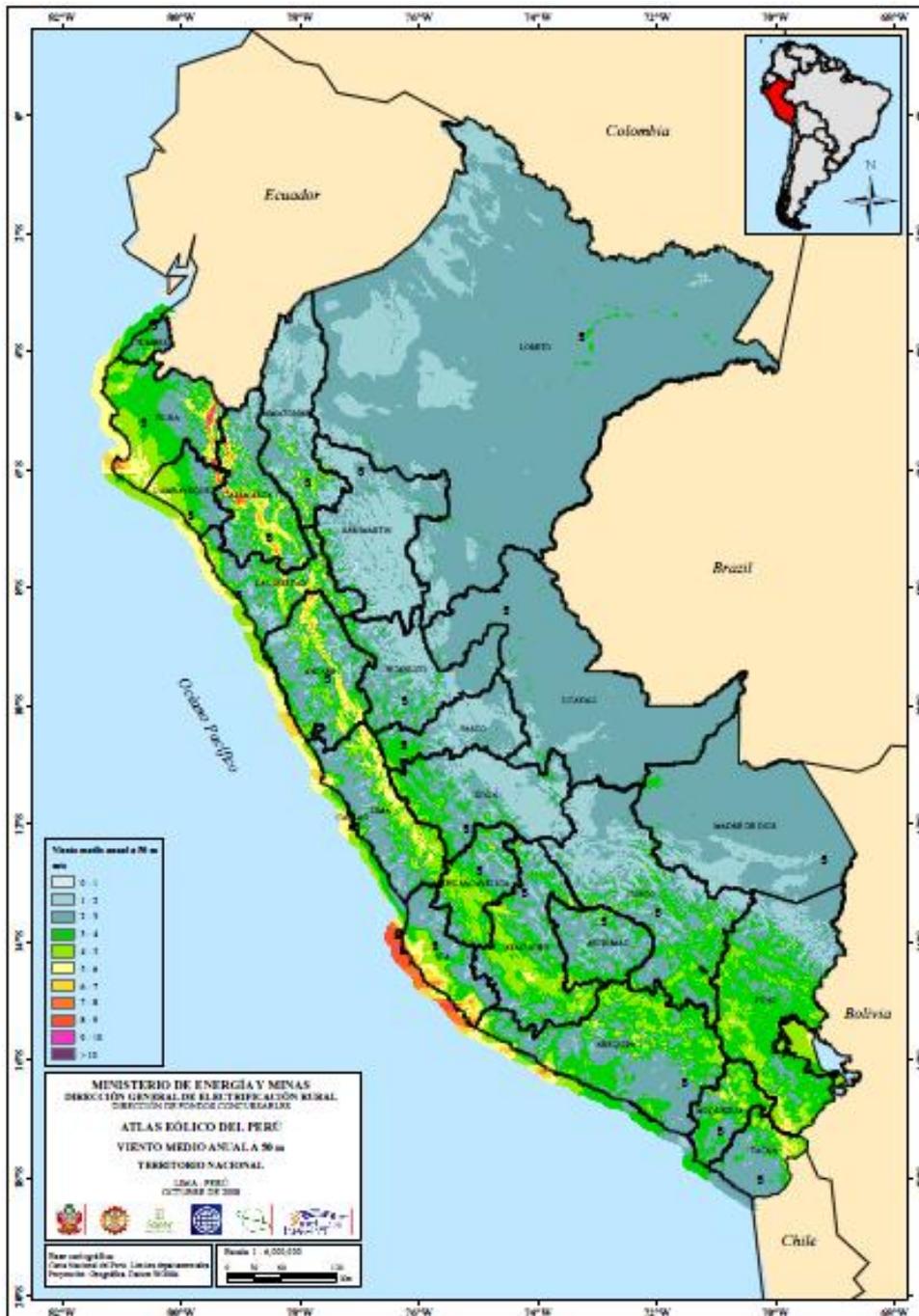


Ilustración A.a: Viento medio anual a 50 m en el Perú (29)

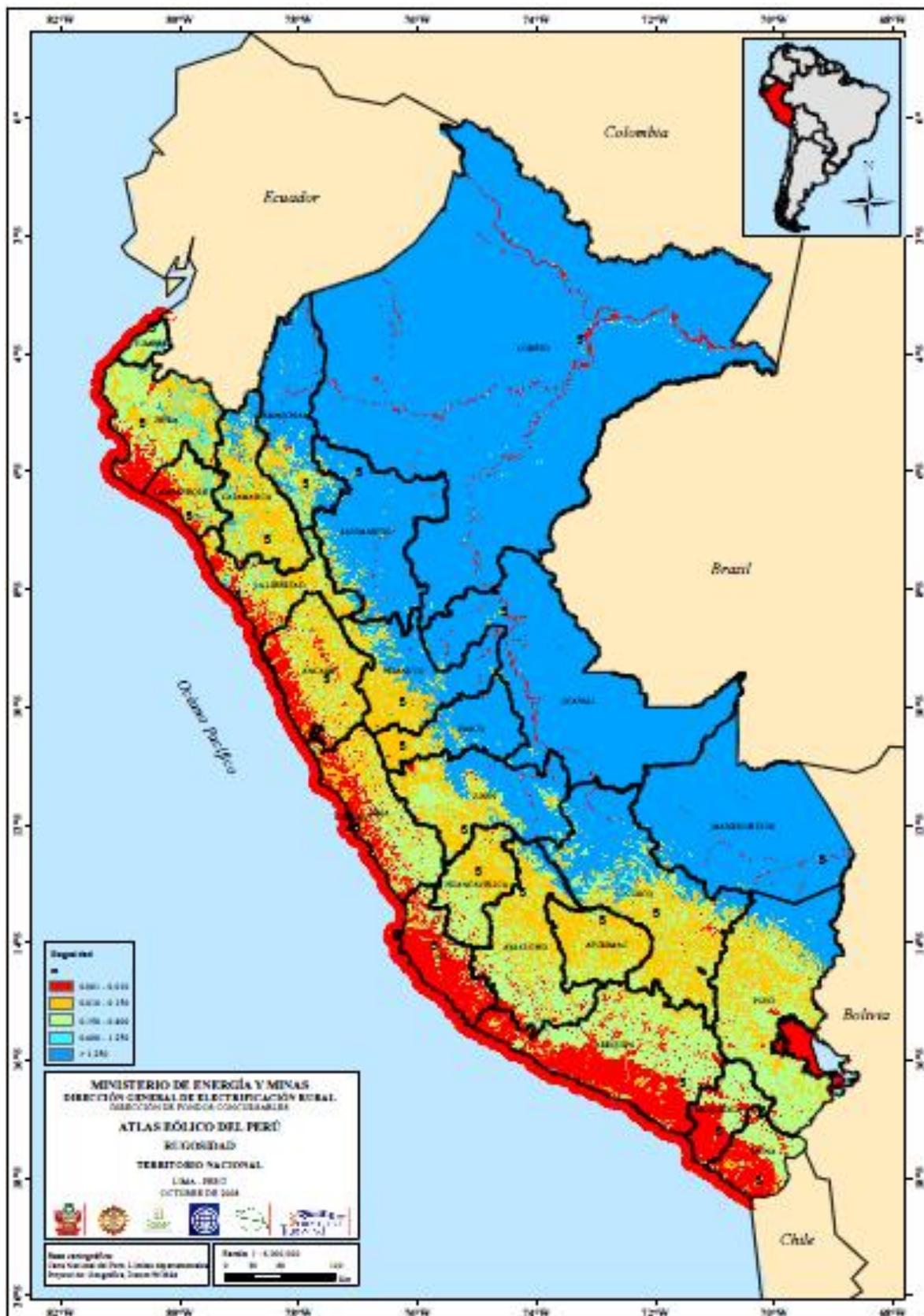


Ilustración A.b: Longitud de rugosidad en el Perú

## B. Reacciones químicas en una batería de plomo-ácido

Una batería almacena energía, recibida en forma eléctrica, transformándola en energía química, y la puede entregar realizando el proceso inverso. Una batería de plomo-ácido tiene un ánodo de plomo (polo negativo) y un cátodo de óxido de plomo (polo positivo); entre ellos se desarrollan reacciones de oxidación-reducción, o sea durante las cuales se realizan traslados de electrones. Los dos electrodos están en remojo en un electrolito, en general una solución de ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  (contiene iones móviles). Véase la Ilustración B.a.

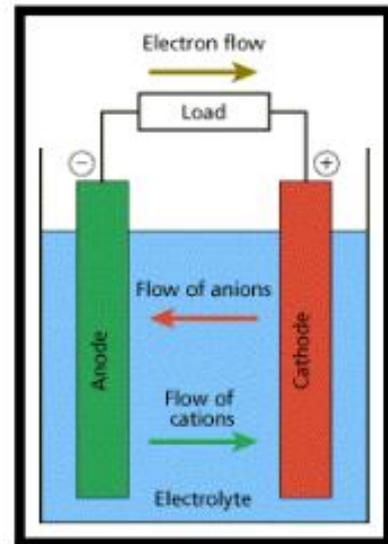
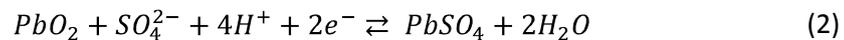


Ilustración B.a: Flujos de electrones e iones entre los electrodos (31)

En el ánodo se desarrolla la siguiente ecuación reversible:



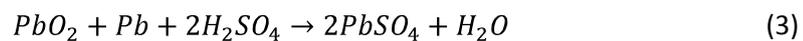
Y en el cátodo:



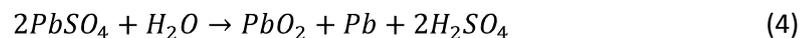
Las reacciones descritas en el ánodo y cátodo son reversibles si la batería no ha estado ni completamente, ni durante mucho tiempo, descargada o sobrecargada. Un funcionamiento prolongado en uno u otro de esos estados llega a la destrucción de la batería.

Los procesos de descarga y de carga se pueden resumir así:

Descarga:



Carga:



## C. Efecto Peukert (18)

---

Intuitivamente pensamos que el tiempo de utilización de una batería con una cierta corriente es inversamente proporcional a la intensidad de esta corriente. Tomamos el ejemplo de una batería de capacidad  $C_{20} = 100$  Ah. Esto significa que la batería puede entregar una corriente de intensidad 5 A durante 20 horas.

Por intuición pensamos que la misma batería podría entregar una corriente de 10 A durante 10 horas. Lamentablemente no es el caso: podría funcionar con esta intensidad de corriente durante un tiempo un poco más corto. Este fenómeno es llamado el efecto Peukert.

Se puede calcular el tiempo durante podrá funcionar una cierta batería según la intensidad de la corriente con la ecuación de Peukert, en la cual interviene el coeficiente de Peukert. Valores típicos para el coeficiente de Peukert son 1.2 o 1.3.

$$T = \frac{C}{I} \cdot \frac{R}{C}^n \quad (2)$$

Donde:	$T$	es el tiempo	[h]
	$I$	es la corriente de descarga	[A]
	$C$	es la capacidad de la batería	[Ah]
	$R$	es la evaluación en horas de la batería (20 horas correspondiendo a C20, 100 horas a C100, etc.)	[h]
	$n$	es el coeficiente de Peukert	[-]

A veces es más simple utilizar esta ecuación así, pero naturalmente se puede escribir de forma más sintética:

$$T = R \cdot \frac{C}{I}^n \quad (3)$$

Con la batería del ejemplo sometida a una corriente de 10 A, si suponemos que el coeficiente de Peukert vale 1.3, tenemos:

$$T = 20 \cdot \frac{100}{10}^{1.3} = 20 \cdot 0.5^{1.3} = 8.12 \text{ h} \quad (4)$$

Entonces esta batería entrega una corriente de 5 A durante 20 horas pero una corriente de 10 A sólo durante 8.12 horas, y no 10.

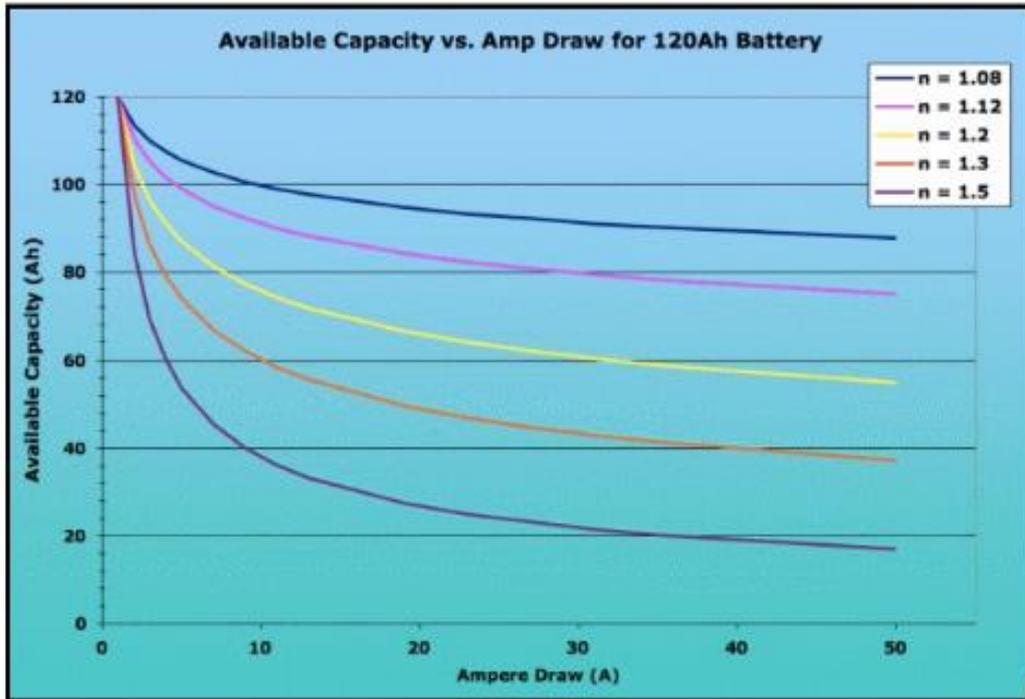


Ilustración C.a: Influencia del coeficiente de Peukert y de la corriente sobre la capacidad de la batería (31)

## D. Principios básicos de electricidad

### D.1. Cargas eléctricas

La electricidad es una energía provocada por el movimiento de cargas eléctricas. No resulta visible, pero es claramente existente por los efectos que produce.

La partícula elemental de la electricidad es el electrón, la mínima expresión de carga eléctrica, que es negativa. La carga eléctrica llevada por un electrón vale el opuesto de la carga eléctrica elemental, o sea  $-1.6 \cdot 10^{-19}$  C (C: coulomb / colombio). Los electrones son partículas subatómicas, junto con los protones y neutrones, que forman el núcleo del átomo, mientras que los electrones se encuentran en torno a este núcleo.

### D.2. Corriente eléctrica

#### D.2.1. Definiciones

La corriente eléctrica es la circulación ordenada de electrones a través de un conductor.

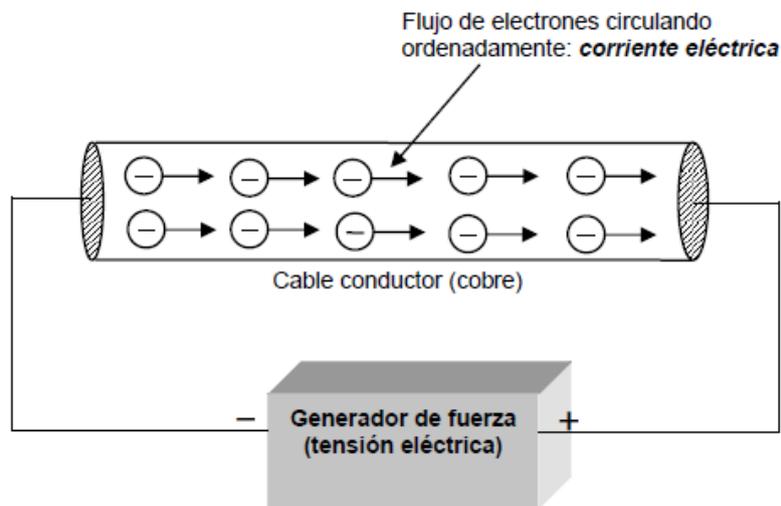


Ilustración D.a: Corriente eléctrica, generada por el movimiento de electrones<sup>27</sup>

La intensidad de la corriente es la cantidad de carga eléctrica que circula por un conductor en la unidad de tiempo. Se mide en amperios (A). De manera convencional, la corriente eléctrica circula en el sentido opuesto al movimiento real de los electrones; se debe a lo que cuando se definió la corriente eléctrica, se pensaba que era debida a un movimiento de cargas positivas.

$$I = \frac{q}{t} \quad (5)$$

Donde:  $I$  es la intensidad de la corriente eléctrica [A]

$q$  es la cantidad de carga eléctrica circulando en el tiempo  $t$  [C]

<sup>27</sup> <http://www.marcombo.com/Descargas/HERMOSA,%20ANTONIO/Electrotecnia-capitul%201.pdf>

$t$  es el tiempo [s]

La tensión eléctrica en los bornes de un dipolo es la circulación del campo eléctrico en este dipolo. Entonces representa el trabajo de la fuerza eléctrica en el dipolo, originada por el campo eléctrico, sobre una carga eléctrica que lo atraviesa, dividido por el valor de la carga: es una energía por unidad de carga, expresada en voltios (V). Este trabajo permite poner en movimiento las cargas eléctricas y provocar la corriente eléctrica. En régimen estacionario, la tensión está asimilada a una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

La corriente eléctrica puede ser continua (CC) o alterna (CA) según el tipo de generador utilizado. Las corrientes continuas se caracterizan por una polaridad de la tensión y un sentido de la corriente constantes a lo largo del tiempo; al contrario, la polaridad de una tensión alterna y el sentido de una corriente alterna van cambiando periódicamente.

Por ejemplo, en el caso de la red eléctrica, la polaridad de la tensión cambia 50 a 60 veces por segundo (dependiendo si la frecuencia característica de la red es 50 o 60 Hz); y el valor eficaz de la tensión es de 220 o 230 V.

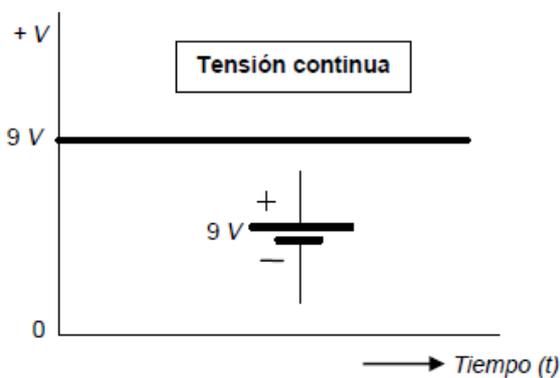


Ilustración D.b: Tensión de corriente continua<sup>28</sup>

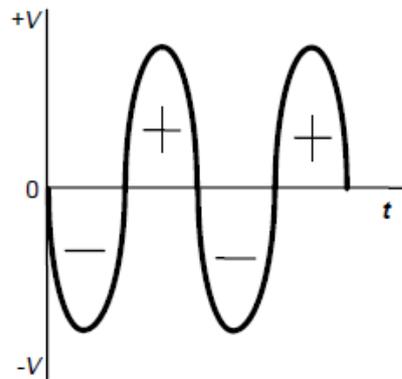


Ilustración D.c: Tensión de corriente alterna<sup>29</sup>

La resistencia eléctrica es la menor o mayor oposición de un cuerpo al paso de la corriente eléctrica. Los materiales que presentan una gran oposición al paso de la electricidad son llamados aislantes y en consecuencia tienen una resistencia eléctrica elevada. Al contrario, los cuerpos que apenas se oponen al paso de la corriente eléctrica son llamados conductores y tienen una resistencia eléctrica muy baja. La resistencia eléctrica se mide en ohmios ( $\Omega$ ).

El valor de la resistencia depende de la longitud, la sección y la resistividad del conductor; la resistividad es característica de un material.

$$R = \rho \frac{L}{S} \tag{6}$$

- Donde:
- $R$  es la resistencia del conductor eléctrico [Ω]
  - $\rho$  es la resistividad del material constituyendo el conductor [Ω.m]
  - $L$  es la longitud del conductor eléctrico [m]
  - $S$  es la sección del conductor eléctrico [m<sup>2</sup>]

<sup>28</sup> <http://www.marcombo.com/Descargas/HERMOSA,%20ANTONIO/Electrotecnia-capitul%201.pdf>

<sup>29</sup> *ibid.*

Por tanto, a mayor longitud de un conductor eléctrico, mayor resistencia, y a mayor sección, menor resistencia.

### D.2.2. Analogía hidráulica

---

Para poder representarse la corriente eléctrica, que es invisible, se suele compararla con un flujo de agua. La corriente eléctrica equivale a la corriente de fluido que circula por una tubería, que es la imagen de la circulación de cargas eléctricas por un conductor eléctrico.

En este símil hidráulico, la intensidad es comparable al caudal, o sea a la cantidad de agua que pasa por la tubería en la unidad de tiempo.

La fuerza que presiona para que los electrones se muevan es la tensión eléctrica. Considerando una cantidad de agua entre dos puntos de niveles diferentes (caída de agua), el agua en el punto más alto tiene una energía potencial gravitatoria. Esta energía es la que permite la puesta en movimiento del agua, convirtiéndose en energía cinética. Similarmente, la tensión, que es una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, permite la puesta en movimiento de los electrones. En lugar de la diferencia de energía potencial debida al desnivel, también se puede comparar con el trabajo realizado por una bomba.

### D.3. Circuitos eléctricos

---

Un circuito eléctrico es una red eléctrica que contiene al menos una trayectoria cerrada.

#### D.3.1. Circuito en serie

---

En un circuito en serie, los bornes de los diferentes dispositivos se conectan secuencialmente: el borne de salida de un dispositivo se conecta al borne de entrada del dispositivo siguiente.

Si el circuito en serie conecta  $n$  dispositivos, la intensidad de corriente circulando en el circuito es la misma en cada punto, mientras que las tensiones se adicionan.

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (7)$$

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (8)$$

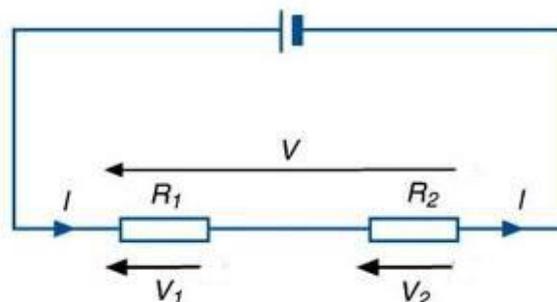


Ilustración D.d: Circuito en serie<sup>30</sup>

<sup>30</sup> [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/series\\_circuit.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/series_circuit.html)

### D.3.2. Circuito en paralelo

---

En un circuito en paralelo, los bornes de entrada de los diferentes dispositivos eléctricos coincidan en un mismo punto. Lo mismo vale para los bornes de salida.

Si el circuito en serie conecta  $n$  dispositivos, la tensión en los bornes de cada dispositivo es la misma, mientras que las intensidades de corriente se adicionan.

$$I_T = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (9)$$

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (10)$$

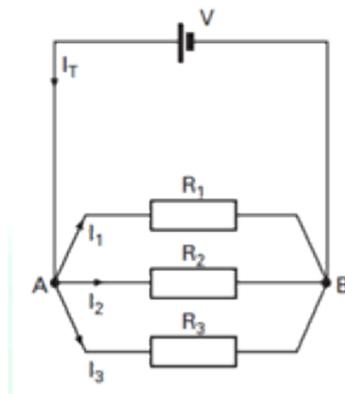


Ilustración D.e: Circuito en paralelo<sup>31</sup>

En una vivienda conectada a la red, los aparatos eléctricos son conectados en paralelo, para que puedan funcionar de manera independiente. Si fueran conectados en serie, la desconexión de sólo un aparato impediría los otros de funcionar, ya que eso abriría el circuito.

### D.3.3. Ley de Ohm

---

La ley de Ohm permite vincular tensión, intensidad y resistencia en un circuito eléctrico. Afirma que la corriente que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia, siempre y cuando su temperatura se mantenga constante.

$$I = \frac{V}{R} \text{ o } V = RI \quad (11)$$

Donde:	$I$	es la intensidad de la corriente eléctrica	[A]
	$V$	es la tensión en los bornes del conductor eléctrico	[V]
	$R$	es la resistencia del conductor eléctrico	[ $\Omega$ ]

### D.4. Potencia y energía eléctricas

---

<sup>31</sup> <http://www.portalelectricos.com/cursos/fundamentoselectricidad5.php>

La potencia eléctrica es la energía eléctrica consumida o liberada en la unidad de tiempo. Se expresa en vatios (W).

$$P = \frac{E}{t} \quad (12)$$

Donde:  $P$  es la potencia [W]  
 $E$  es la energía consumida o liberada [J], o [Wh]  
 $t$  es el tiempo en el cual la energía es consumida o liberada [s], o [h]

El elemento que libera energía es un generador y el que consume energía es un receptor. Del punto de vista receptor, se puede decir que la potencia eléctrica es la capacidad que tiene éste para transformar la energía eléctrica en otro tipo de energía; cuanto más rápido sea capaz de realizar esta transformación, mayor será la potencia del mismo. Viceversa, del punto de vista generador, se puede decir que la potencia eléctrica es la capacidad que tiene éste para transformar otro tipo de energía en energía eléctrica.

Aunque la unidad del tiempo y la de la energía sean en el sistema internacional de unidades (S.I.) respectivamente el segundo (s) y el julio o joule (J), se suele en el ámbito de instalaciones eléctricas en viviendas y otros expresar el tiempo en horas (h) y por tanto la energía en vatios-horas (Wh).

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J} \quad (13)$$

En corriente continua, la potencia de un dispositivo es el producto de la tensión en sus bornes por la intensidad de la corriente que lo atraviesa.

$$P = V \cdot I \quad (14)$$

Donde:  $P$  es la potencia [W]  
 $V$  es la tensión en los bornes del dispositivo [V]  
 $I$  es la intensidad de la corriente en el dispositivo [A]

Por tanto, utilizando la ley de Ohm, se puede calcular la potencia perdida en forma de calor en una resistencia eléctrica, eso siendo llamado el efecto Joule:

$$P = V \cdot I = RI^2 \quad (15)$$

En corriente alterna sinusoidal monofásica, la potencia es el producto de los valores eficaces de la tensión y de la intensidad con el coseno de la desfase entre la tensión y la intensidad.

$$P = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi \quad (16)$$

Donde:  $P$  es la potencia [W]  
 $V_{ef}$  es la tensión eficaz en los bornes del dispositivo [V]  
 $I_{ef}$  es la intensidad eficaz de la corriente en el dispositivo [A]

Puesto que un valor eficaz se define en régimen sinusoidal como el valor máximo dividido por la raíz cuadrada de 2,

$$P = \frac{1}{2} V_{max} \cdot I_{max} \cdot \cos \varphi \quad (17)$$

Donde:  $V_{max}$  es la tensión máxima en los bornes del dispositivo [V]  
 $I_{max}$  es la intensidad máxima de la corriente en el dispositivo [A]  
 $\varphi$  es la desfase de la intensidad relativamente a la tensión [rad] o [°]