



EL42C

CONVERSIÓN ELECTROMECHANICA DE LA ENERGÍA



IX. ENERGÍA EÓLICA



9.1 INTRODUCCIÓN

9.1 INTRODUCCIÓN

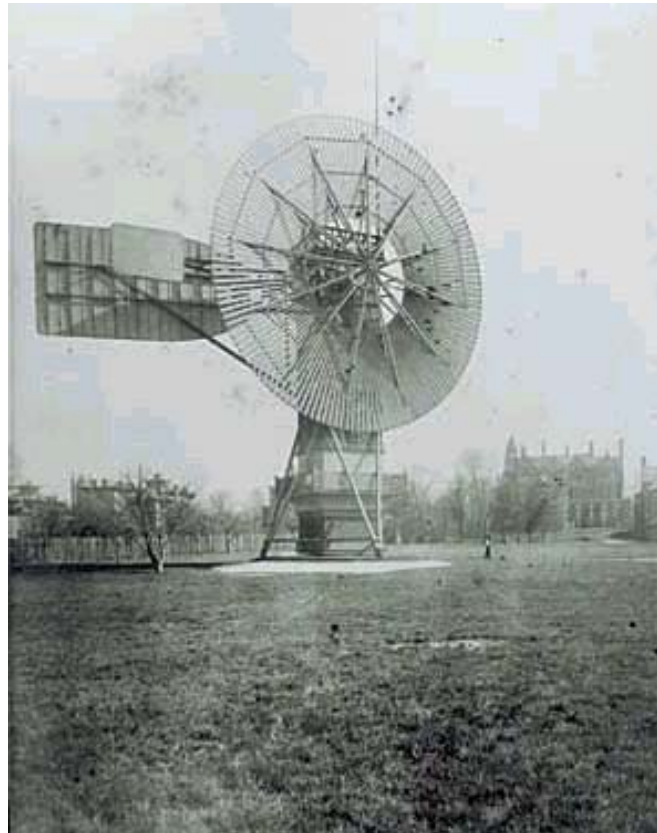
- Energía del viento hace girar una turbina acoplada a un generador.
- Tipos de aerogeneradores: de velocidad fija y variable, bi-pala, tri-pala, etc.
- En un sistema (parque eólico), se requieren de sistemas de control individual y del conjunto.
- En 1986 esta energía alcanzó los 10 [TWh], actualmente es sobre 20 [TWh], a nivel mundial. Se proyecta un 12% mundial y un 20% para Europa.
- Su integración en el mercado eléctrico puede llegar hasta un 20%.
- Alemania, España, Dinamarca y EE.UU. lideran la producción. En menor escala: China, India, Marruecos.



9.1 INTRODUCCIÓN

❑ DESARROLLO HISTÓRICO DE LA GENERACIÓN EÓLICA

- 1887-88: Charles F. Brush, construye la primera turbina eólica (de giro lento). Rotor de 17 [m] de diámetro, 144 aspas de cedro, 12 [kW]





9.1 INTRODUCCIÓN

❑ DESARROLLO EN CHILE

- 2001, entra en operación la central eólica Alto Baguales (Coyhaique) de la empresa SAESA.
- Capacidad instalada: 1,980 [MW].
- Tres turbinas V47 (VESTAS) de 660 [kW] c/u, ubicadas a 40 [m] de altura.
- Representa cerca del 10% del sistema de la región de Aysén.
- Rotor de 47 [m], tres aspas.
- Generador asíncrono, de velocidad variable.
- Operan directamente con la red (50 [Hz]).
- Requieren de un transformador elevador 690/33000 [V].



9.1 INTRODUCCIÓN

- Poul la Cour estudió la aerodinámica mediante túneles de viento. Concluyó que las turbinas de giro rápido y con rotor de pocas palas son más eficientes.
- 1940, F. L. Smidth experimenta con aerogeneradores bi y tri-pala.
- Johannes Juul, inicia el desarrollo de aerogeneradores a C.A.
- 1980 se producían modelos hasta 55 [kW]. Actualmente hasta los 2,5 [MW] debido a innovaciones en materiales, aerodinámica y sistemas de control electrónicos; a su vez, son más eficientes y de costos competitivos.





9.1 INTRODUCCIÓN

- Poseen un sistema de control aerodinámico tipo *pitch*, que permite orientar las aspas óptimamente.
- Cuentan con el sistema *OptiSlip* que controla el deslizamiento del generador mediante la variación de la resistencia rotórica, haciendo que la velocidad de giro esté entre los 1515 y 1650 [RPM].
- A través de un banco de condensadores se controla el factor de potencia de cada unidad.
- La conexión y desconexión de los aerogeneradores se realizan mediante tiristores.
- Durante el año 2002 este parque generó 6,5 [GWh]



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

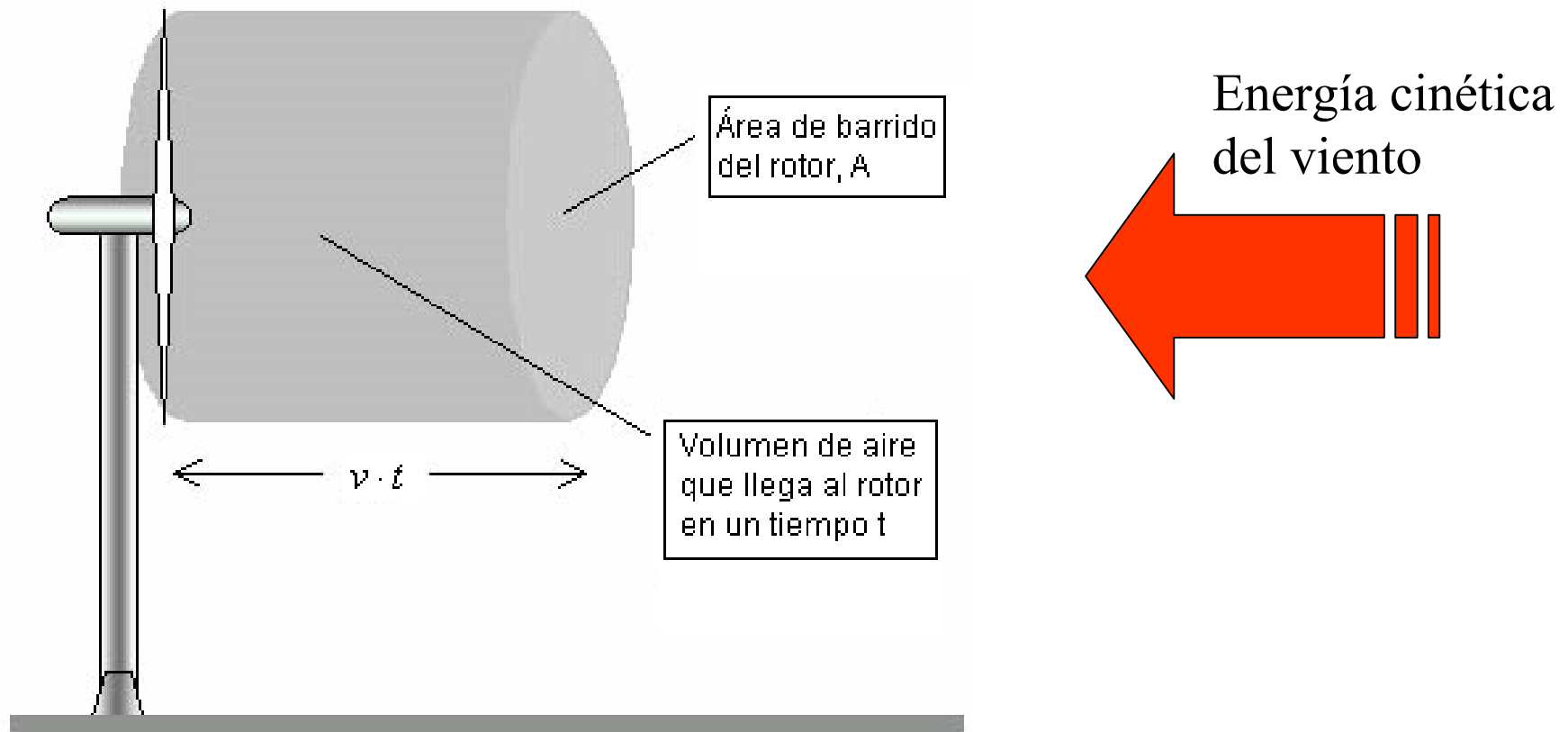
□ FUNDAMENTOS DE LA ENERGÍA EOLICA

- La energía disponible a partir del viento depende de la velocidad del mismo al cubo \Rightarrow Pequeñas variaciones en este parámetro afectarán enormemente la energía final obtenida
- La característica más crítica del viento como recurso energético primario es su variabilidad
 1. Espacial
 2. Temporal



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

- Un aerogenerador toma la energía cinética del viento y la transforma en energía mecánica rotacional.





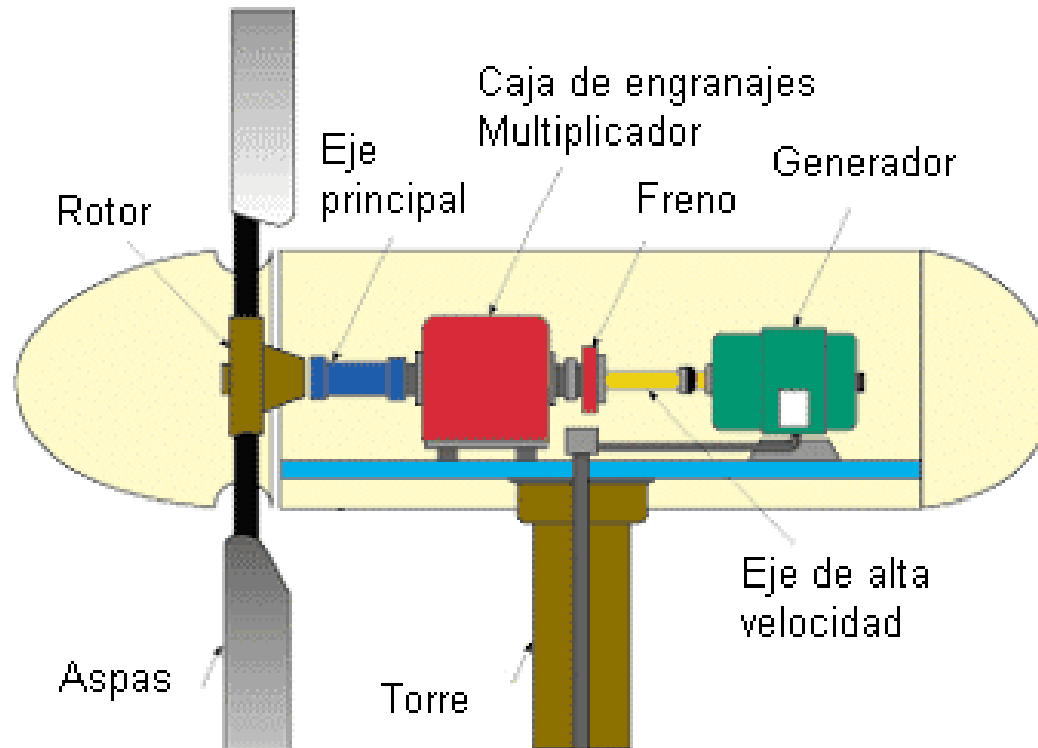
9.2 Fundamentos de la energía Eólica

- Una masa de aire que mueve las aspas del aerogenerador.
- Las aspas, unidas al eje del rotor, permiten a este último transmitir el movimiento giratorio al multiplicador (o caja de engranajes).
- El multiplicador es un conjunto de engranajes encargados de aumentar la velocidad de rotación hasta 1500 [rpm], cuyo eje de salida está unido al del generador de forma tal de alimentarlo para la producción de electricidad.
- También existe un sistema de acoplamiento directo a la red, es decir, sin multiplicador



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

Esquema general de un aerogenerador (con multiplicador)





9.2 Fundamentos de la energía Eólica

La energía cinética de una masa de aire es: $E_C = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$

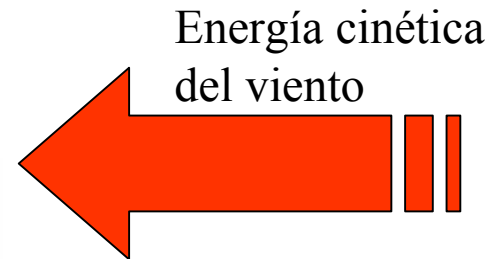
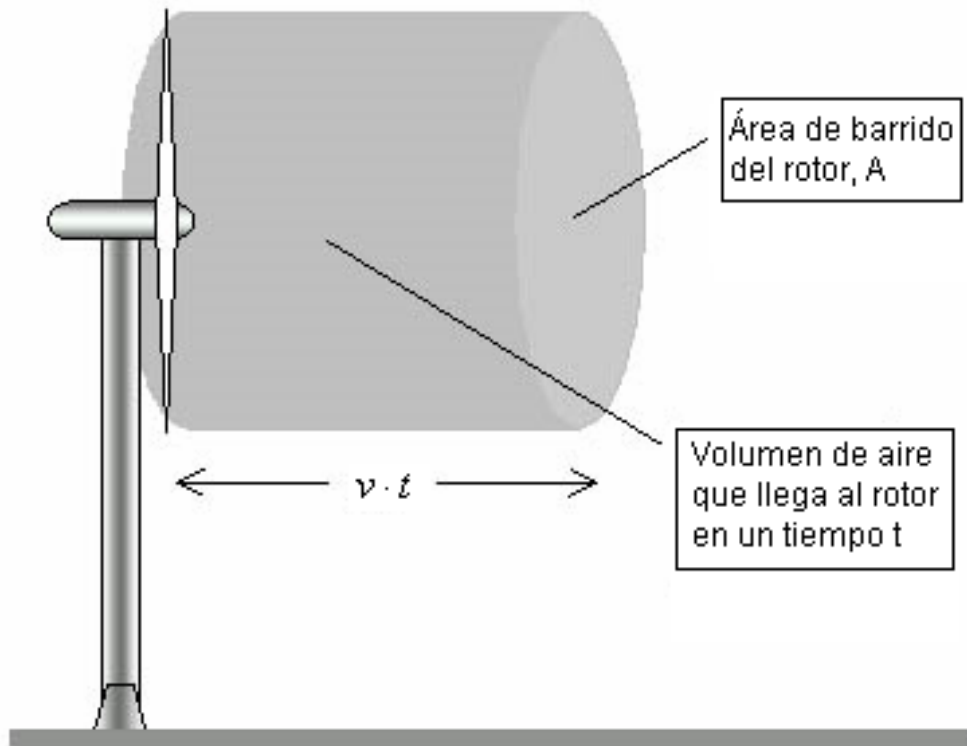
Si el volumen de aire que se mueve es V , y la densidad del aire es ρ , entonces su masa será: $m = V \cdot \rho \Rightarrow E_C = \frac{1}{2} \cdot V \cdot \rho \cdot v^2$

Variable	Descripción	Unidad
E_C	Energía cinética contenida en la masa de aire	$[J]$
m	Masa del aire	$[Kg]$
v	Velocidad de la masa de aire	$\left[\frac{m}{s}\right]$
V	Volumen de aire	$[m^3]$
ρ	Densidad del aire	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

Por otra parte, el volumen de aire que llega al área de barrido del rotor en un tiempo viene dado por la expresión: $V = A \cdot v \cdot t$



$$\Rightarrow E_c = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot t \cdot v^3$$



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

Dado que la potencia se define como la variación temporal de energía, entonces es posible escribir que la potencia total contenida en la masa de aire (sin perturbar), que llega al rotor durante el tiempo será:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot t \cdot v^3$$

$$\Rightarrow P_v = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3$$

Potencia contenida
en la masa de aire



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

Sin embargo, el saber cuál es el contenido energético de la masa de aire incidente en el área de barrido del rotor no es lo más importante

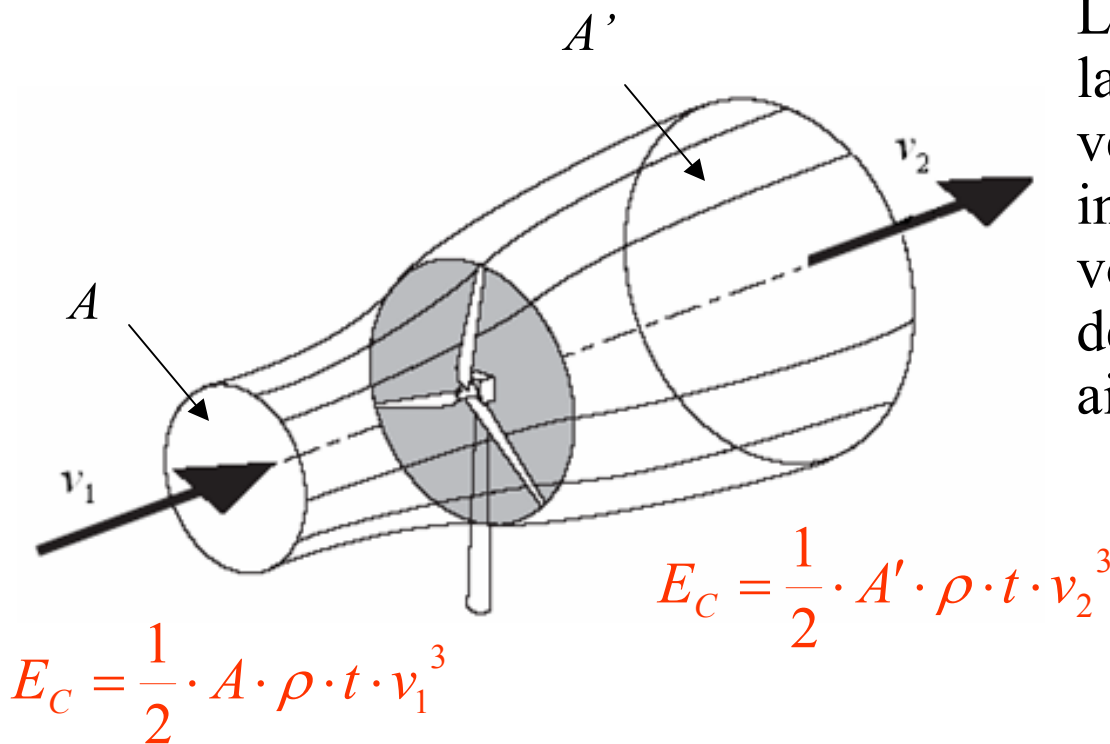
¿Cuánta de esta energía es aprovechable por la turbina para la generación de electricidad?

La ley de Betz, formulada por primera vez por el físico alemán Albert Betz en 1919, entrega un límite teórico de la máxima energía aprovechable por una turbina para la producción de electricidad.



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

El viento incidente sobre la turbina tendrá un mayor contenido energético que el que la abandona .



La masa de aire que abandona la turbina tendrá una menor velocidad que la masa incidente y ocupará un volumen mayor de forma tal de acomodar esta masa de aire “más lenta”



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

¿Cuanta de esta energía cinética de la masa de aire incidente puede ser transformada en energía mecánica rotacional por el rotor?

La Ley Betz que asegura que sólo puede convertirse como máximo un 59% de la energía cinética del viento incidente

Para obtener este resultado, se considerará que la velocidad promedio del viento a través del área del rotor



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

El promedio de la velocidad del viento antes y después de incidir en el rotor es:

$$\bar{v} = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2)$$

Variable	Descripción	Unidad
\bar{v}	Velocidad promedio del viento a través del área del rotor	$\left[\frac{m}{s} \right]$
v_1	Velocidad del viento antes de incidir en el rotor	$\left[\frac{m}{s} \right]$
v_2	Velocidad del viento después de su paso por el rotor	$\left[\frac{m}{s} \right]$

Recordando las ecuaciones:

$$m = V \cdot \rho \quad \wedge \quad V = A \cdot v \cdot t \quad \Rightarrow$$

$$m = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \cdot t \cdot A \cdot \rho$$

Masa de aire promedio que incide sobre las aspas del rotor en un tiempo t.



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

De acuerdo a la Segunda Ley de Newton, la energía del viento extraída por el rotor de la turbina es igual a:

$$E_{Tur} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

Reemplazando la expresión para la masa $m = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \cdot t \cdot A \cdot \rho$ se obtiene:

$$E_{Tur} = \frac{1}{4} \cdot (v_1 + v_2) \cdot t \cdot A \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

Nuevamente, usando que la potencia es la variación temporal de la energía:

$$P_{Tur} = \frac{1}{4} \cdot (v_1 + v_2) \cdot A \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

Para la obtención de la Ley de Betz, se calcula el cuociente entre el resultado anterior y la potencia total de una masa de aire que atraviesa exactamente la misma área, pero sin ningún rotor que bloquee el viento. Es decir, el cuociente entre

$$P_{Tur} = \frac{1}{4} \cdot (v_1 + v_2) \cdot A \cdot \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad P_v = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot ((v_1 + v_2)/2)^3$$

Después de algo de algebra es posible obtener la relación:

$$\frac{P_{Tur}}{P_v} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right)$$

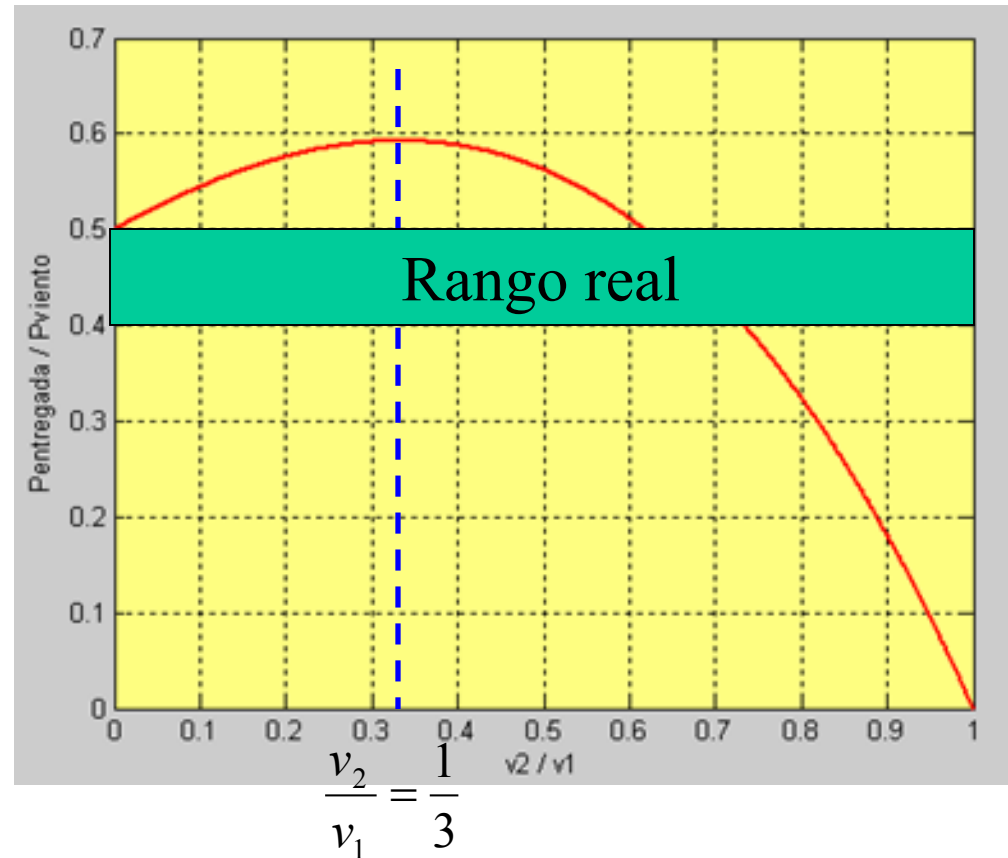


9.2 Fundamentos de la energía Eólica

gráfico de $\frac{P_{Tur}}{P_v}$ en función
de $\frac{v_2}{v_1}$

El máximo de esta
función es

$$\frac{P_{Tur}}{P_v} = 0.5926$$



A partir del desarrollo anterior, es posible escribir la relación:

$$P_{Tur} = 0.5926 \cdot P_v$$

Ley de Betz



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

Esta curva entrega la máxima cantidad de energía cinética contenida en la masa de aire incidente que puede ser transformada en energía mecánica rotacional por el rotor. La ecuación representa una curva teórica que, si bien no considera varios factores de la operación real, entrega un resultado de suma importancia para el desarrollo de todo tipo de máquinas eólicas.



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

Es importante mencionar que este valor máximo de transformación es imposible de alcanzar en la práctica. Actualmente, los valores que se llegan a obtener en la generación de electricidad están entre 0.4 y 0.5 usando tecnologías modernas.



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

❑ COEFICIENTE DE POTENCIA

El coeficiente de potencia de un aerogenerador es el rendimiento con el cual éste funciona. Se denota por C_P y expresa qué fracción de la potencia total que posee el viento incidente es realmente capturada por el rotor de dicho aerogenerador para ser transformada en energía rotacional (cuyo máximo valor teórico es el límite de Betz 0.5926).

Se define como:

$$C_P = \frac{P_{Tur}}{0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3}$$

P_{Tur} : Potencia realmente capturada por el rotor de la turbina.

↖ Potencia total incidente



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

La llamada velocidad adimensional, o TSR (Tip Speed Ratio) por sus siglas en inglés, es un término que sirve para comparar el funcionamiento de diferentes máquinas eólicas. Se trata de un cociente que relaciona la velocidad del aspa (del radio r) con la velocidad del viento incidente.

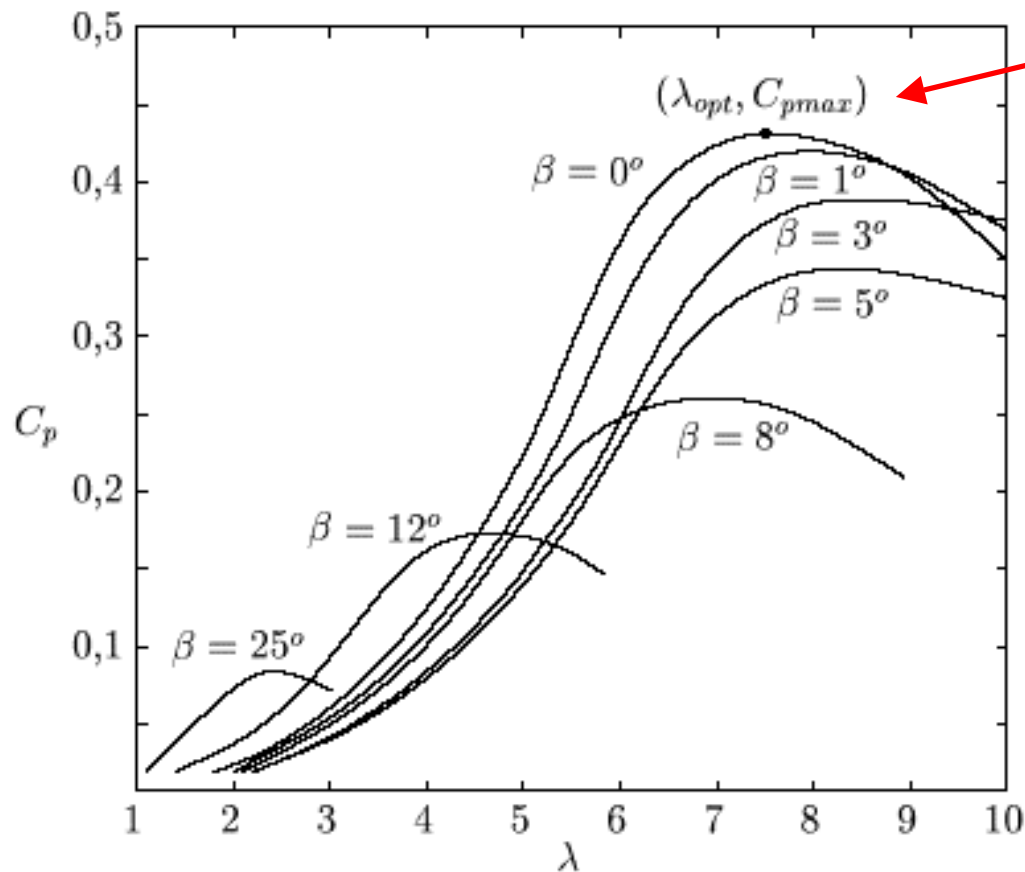
El TSR indica que la periferia de la pala circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento. El TSR se define por:

$$\lambda = \frac{\omega_{Tur} \cdot r}{v}$$



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

La figura muestra la relación entre el coeficiente de potencia y el TSR para una turbina típica de eje horizontal



Punto de máxima eficiencia.

Para el caso de aerogeneradores de velocidad variable, se trata de hacer girar la turbina a una velocidad de forma tal de operar en ese punto.



9.2 Fundamentos de la energía Eólica

El coeficiente de potencia con que funciona un aerogenerador no es constante, variando en función de la velocidad del viento incidente, de la velocidad de giro de las palas y del ángulo de paso

$$C_P = \frac{P_{Tur}}{0.5 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3}$$

En la actualidad, se destinan grandes esfuerzos a buscar mejoras en los coeficientes de potencia mediante cambios en el diseño de rotores y mediante una operación que permita mantener el máximo valor del coeficiente de potencia dentro de un rango de velocidades de viento



9.3. CONTROL DE UNA CENTRAL EÓLICA

Fundamentalmente se realizan dos tipos de controles:

1. Control sobre la operación de los aerogeneradores.

Mecanismo de orientación *yaw control*:

- Actúa girando el rotor de la turbina con el fin de mantenerlo en contra del viento, en forma perpendicular.
- Se realiza mediante motores y multiplicadores controlados electrónicamente.
- Posee además un control sobre la torsión de los cables, que evita su deterioro.





9.3. CONTROL DE UNA CENTRAL EÓLICA

Regulación por cambio de ángulo de paso *pith controlled*:

Cuando la potencia generada es demasiada alta o baja el controlador envía una orden que hace girar las palas del rotor en contra o favor del viento, según sea el caso, manteniendo el ángulo para un óptimo desempeño.

Regulación por pérdida aerodinámica *stall controlled passive*:

En este caso los aerogeneradores tienen las palas unidas al buje en un ángulo fijo, su diseño aerodinámico permite que cuando la velocidad del viento es alta, se cree una turbulencia en la parte donde no da el viento, evitando que esta fuerza influya sobre el rotor. Así se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control

Alrededor de las 2/3 partes de los aerogeneradores son de este tipo.



9.3. CONTROL DE UNA CENTRAL EÓLICA

Regulación activa por pérdida aerodinámica *stall controlled active*:

Este sistema se desarrolla en aerogeneradores > 1 [MW]. Poseen palas que pueden girar a bajas velocidades del viento. Si el generador tiende a sobrecargarse aumenta el ángulo de paso de las palas para llevarlas a una posición de mayor pérdida de sustentación y así consumir el exceso de energía. Puede funcionar casi a la potencia nominal a todas las velocidades del viento.

Algunos aerogeneradores utilizan alerones *flaps* para controlar la potencia del rotor.

Otra posibilidad, usada en aerogeneradores pequeños, es que el rotor oscile lateralmente fuera del viento para disminuir la potencia (desalineación del rotor).



9.3. CONTROL DE UNA CENTRAL EÓLICA

2. Control sobre la potencia inyectada a la red.

Se requiere un control que permita la conexión del parque a la red (frecuencia, tensión) y que considere la calidad del suministro (armónicas).

El generador debe ser conectado a la red en el momento en que el rotor gire a velocidad nominal.

Los generadores actuales tienen un arranque suave, se conectan y desconectan de la red gradualmente mediante tiristores.

El controlador debe supervisar constantemente la frecuencia y la tensión de la red, pues en caso de que estas variables salgan de ciertos límites, la turbina debe desconectarse de la red y detenerse, posteriormente debe reconectarse en forma gradual.



9.4. GENERACIÓN EÓLICA Y CALIDAD DE SUMINISTRO

La calidad de suministro considera las variaciones de voltaje en régimen permanente, el control de reactivos y la distorsión armónica en la red.

□ IMPACTO EN EL VOLTAJE EN RÉGIMEN PERMANENTE

El impacto del voltaje en régimen permanente en el punto de acoplamiento de la planta con la red se realiza controlando la potencia reactiva.

□ VARIACIONES DINÁMICAS DE VOLTAJE

Las variaciones de voltaje se deben al flujo de potencia de la red. Requieren de un monitoreo casi instantáneo de la tensión. Se destaca el efecto de parpadeo del voltaje o *flicker*, el cual puede minimizarse en turbinas con velocidad variable.

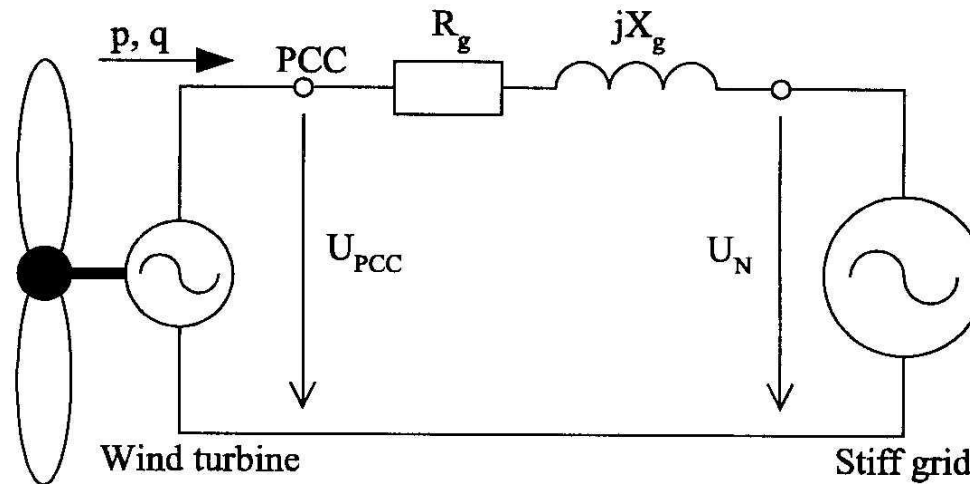


9.4. GENERACIÓN EÓLICA Y CALIDAD DE SUMINISTRO

□ INYECCIÓN DE REACTIVOS

La potencia reactiva intercambiada entre la red y la turbina depende del diseño de ésta.

Un parque eólico conectado a la red se puede modelar como:



El voltaje en el punto común de acoplamiento sería:

$$U_{PCC} = R_g \left(\frac{P}{U_n} \right) + X_g \left(\frac{Q}{U_n} \right) + U_n$$



9.4. GENERACIÓN EÓLICA Y CALIDAD DE SUMINISTRO

donde U_n es la tensión nominal de la red, P la potencia activa generada, Q la potencia reactiva consumida y R_g y X_g son los parámetros de la red.

De la ecuación anterior se desprende la importancia del control de reactivos en la planta para mantener la tensión en en punto de acoplamiento.

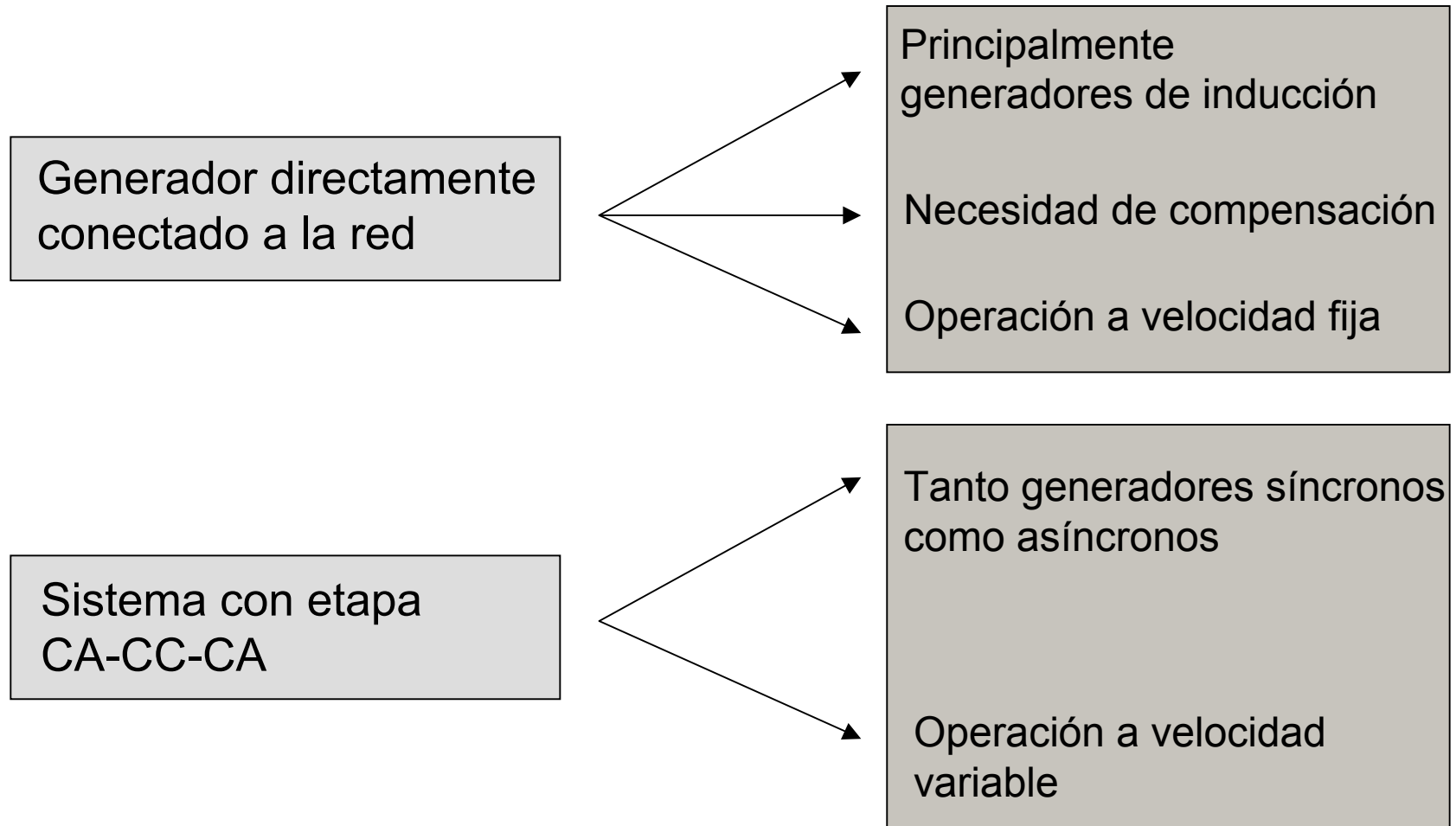
□ DISTORSIÓN ARMÓNICA

Esta se presenta al emplear equipos de acoplamiento basados en elementos de electrónica de potencia. Se soluciona incorporando filtros adecuados antes del transformador elevador.



9.4. GENERACIÓN EÓLICA Y CALIDAD DE SUMINISTRO

Los sistemas eólicos se pueden clasificar de acuerdo a:





9.5. CALIDAD DE SUMINISTRO PARA DIFERENTES TIPOS DE GENERADORES.

❑ AEROGENERADORES DE VELOCIDAD FIJA

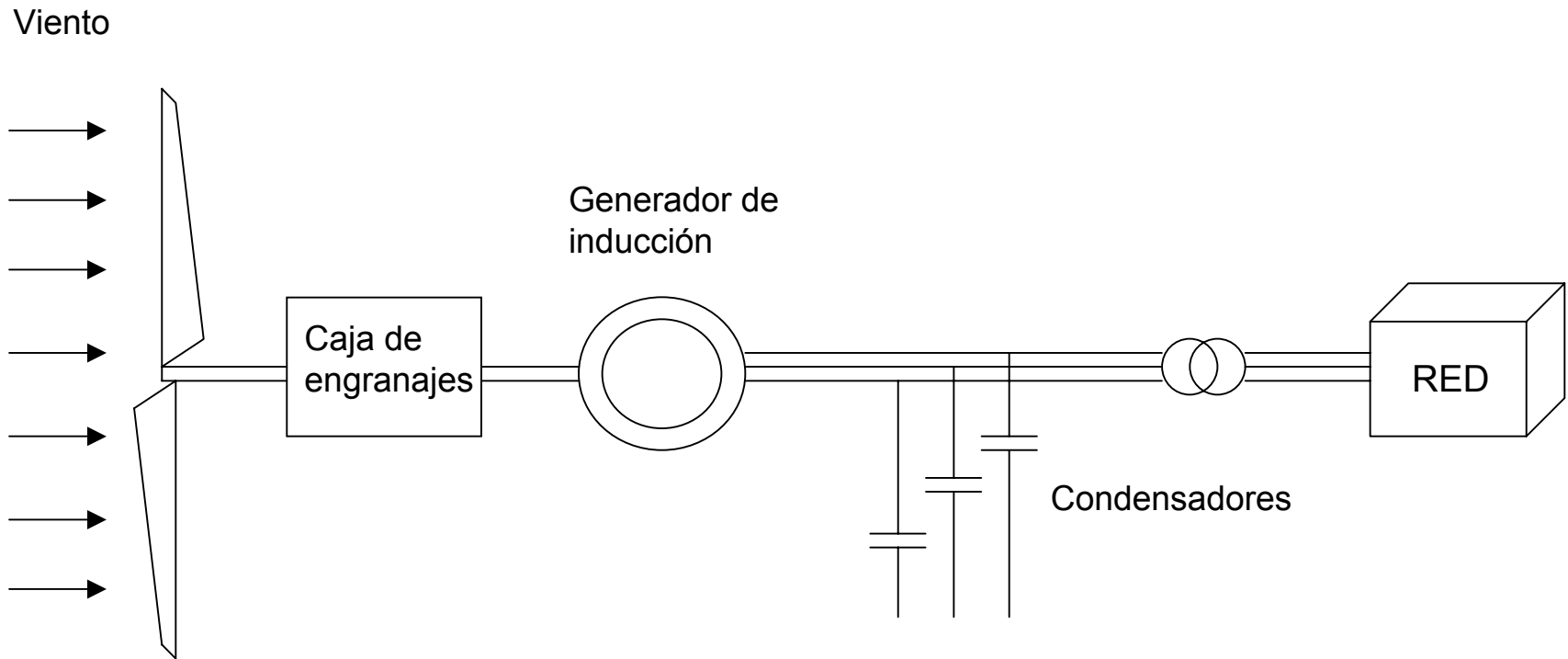
- Típicamente son generadores de inducción que se utilizan en forma inversa haciéndolos girar a una velocidad mayor que su velocidad de sincronismo
- Los del tipo jaula de ardilla son los más utilizados debido a que su costo es bajo, son robustos, requieren poco mantenimiento y se pueden conectar directamente a la red.
- En todo el intervalo de operación normal de un generador asíncrono conectado a la red, su velocidad de giro se mantiene limitada por la frecuencia de ésta.
- Los generadores síncronos no son apropiados para integrar aerogeneradores de velocidad constante (sistema muy rígido)



9.5. CALIDAD DE SUMINISTRO PARA DIFERENTES TIPOS DE GENERADORES.

❑ AEROGENERADORES DE VELOCIDAD FIJA

La figura muestra un sistema de velocidad fija con generador de inducción (asíncrono).





9.5. CALIDAD DE SUMINISTRO PARA DIFERENTES TIPOS DE GENERADORES.

Principales problemas

- Una de las principales desventajas de las máquinas de inducción usadas como generadores es que demandan potencia reactiva de forma tal de magnetizar el estator \Rightarrow Problemas con el voltaje
- Las fluctuaciones de potencia en el viento se traducen en fluctuaciones de potencia eléctrica generada
- El rotor trabaja a una eficiencia menor que aquella para la que fue diseñado. ¡Existe un único valor de velocidad para el cual la eficiencia del rotor es máxima! (si su velocidad de operación no estuviera limitada por la frecuencia de la red, extraerían más energía del viento) \Rightarrow VELOCIDAD VARIABLE



9.5. CALIDAD DE SUMINISTRO PARA DIFERENTES TIPOS DE GENERADORES.

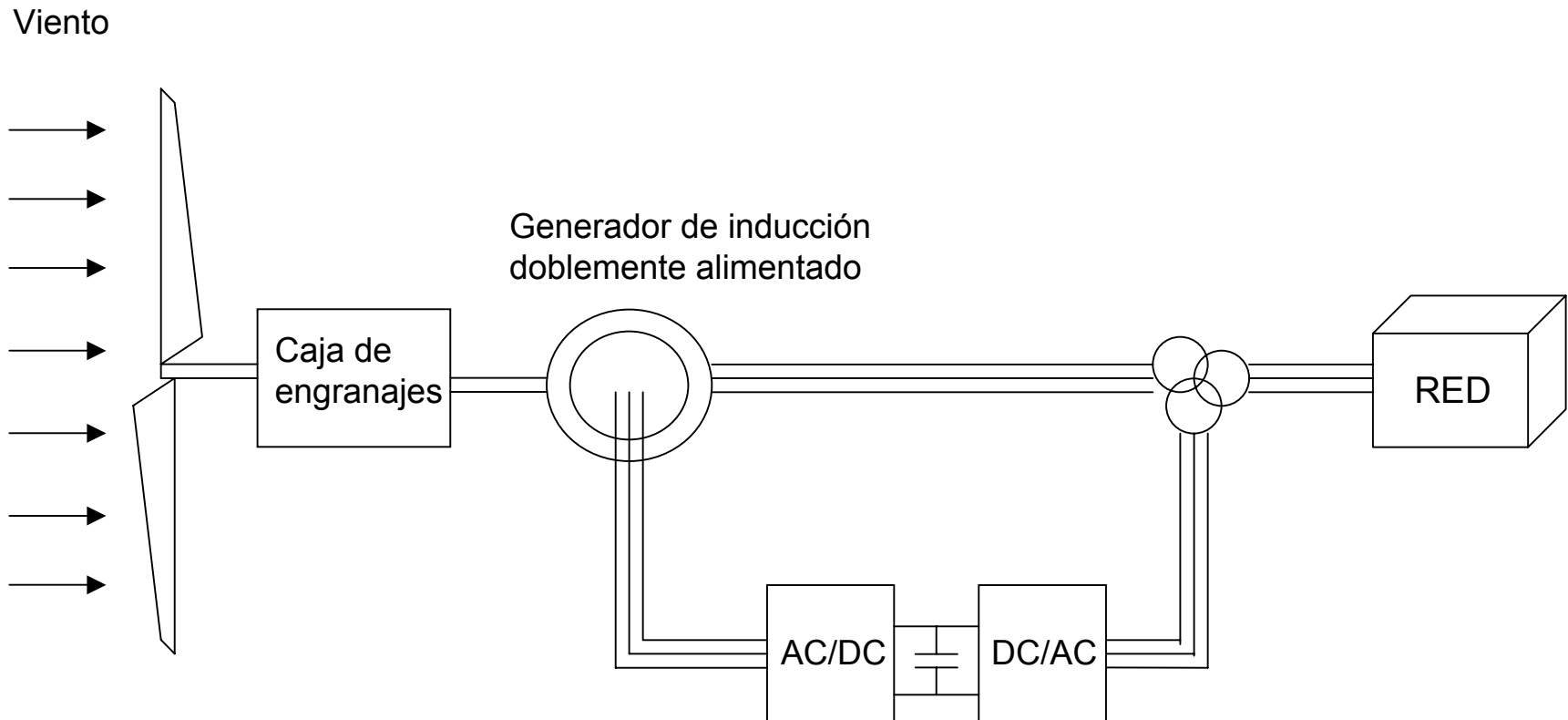
❑ AEROGENERADORES DE VELOCIDAD VARIABLE

- La velocidad de operación no se encuentra limitada por la frecuencia de la red.
- La gran ventaja de una turbina que funciona a velocidad variable es que puede ajustar constantemente la velocidad del rotor de forma tal de tener la TSR requerida para el máximo coeficiente de potencia en un amplio rango de velocidades de viento \Rightarrow *Pitch Control*
- En la actualidad, las tecnologías de punta alcanzan valores de rendimiento próximos al 50%



9.5. CALIDAD DE SUMINISTRO PARA DIFERENTES TIPOS DE GENERADORES.

Generador de inducción doblemente alimentado: los devanados del estator se conectan directamente a la red eléctrica mientras que los del rotor se conectan a través de un conversor bi-direccional a través del cual se controla la potencia activa y reactiva en forma independiente.





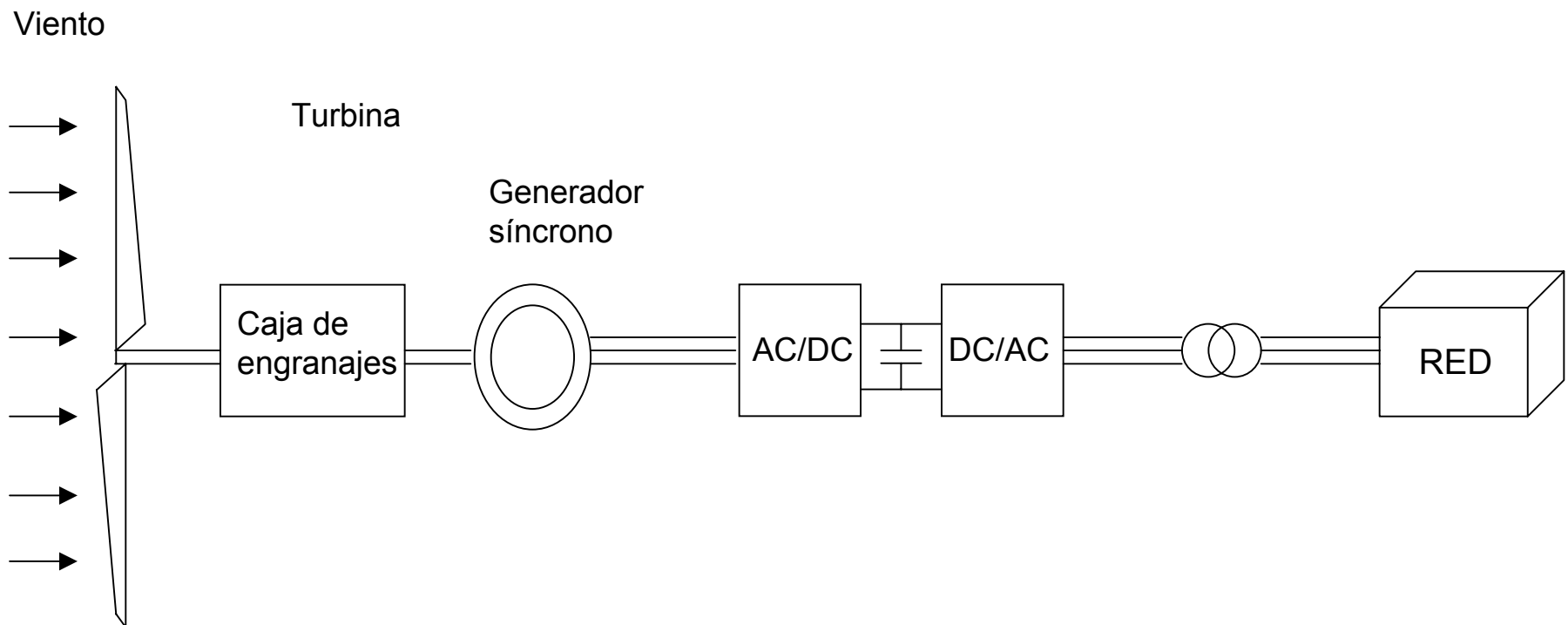
9.5. CALIDAD DE SUMINISTRO PARA DIFERENTES TIPOS DE GENERADORES.

- La variación de velocidad permite reducir la fatiga de las componentes mecánicas y las fluctuaciones de tensión
- Se aprovecha mejor la potencia del viento a velocidades bajas manteniendo la velocidad de giro próxima al punto de máxima absorción de energía
- Los convertidores controlan el voltaje del rotor en magnitud y fase con lo cual controlan la potencia activa y reactiva



9.5. CALIDAD DE SUMINISTRO PARA DIFERENTES TIPOS DE GENERADORES.

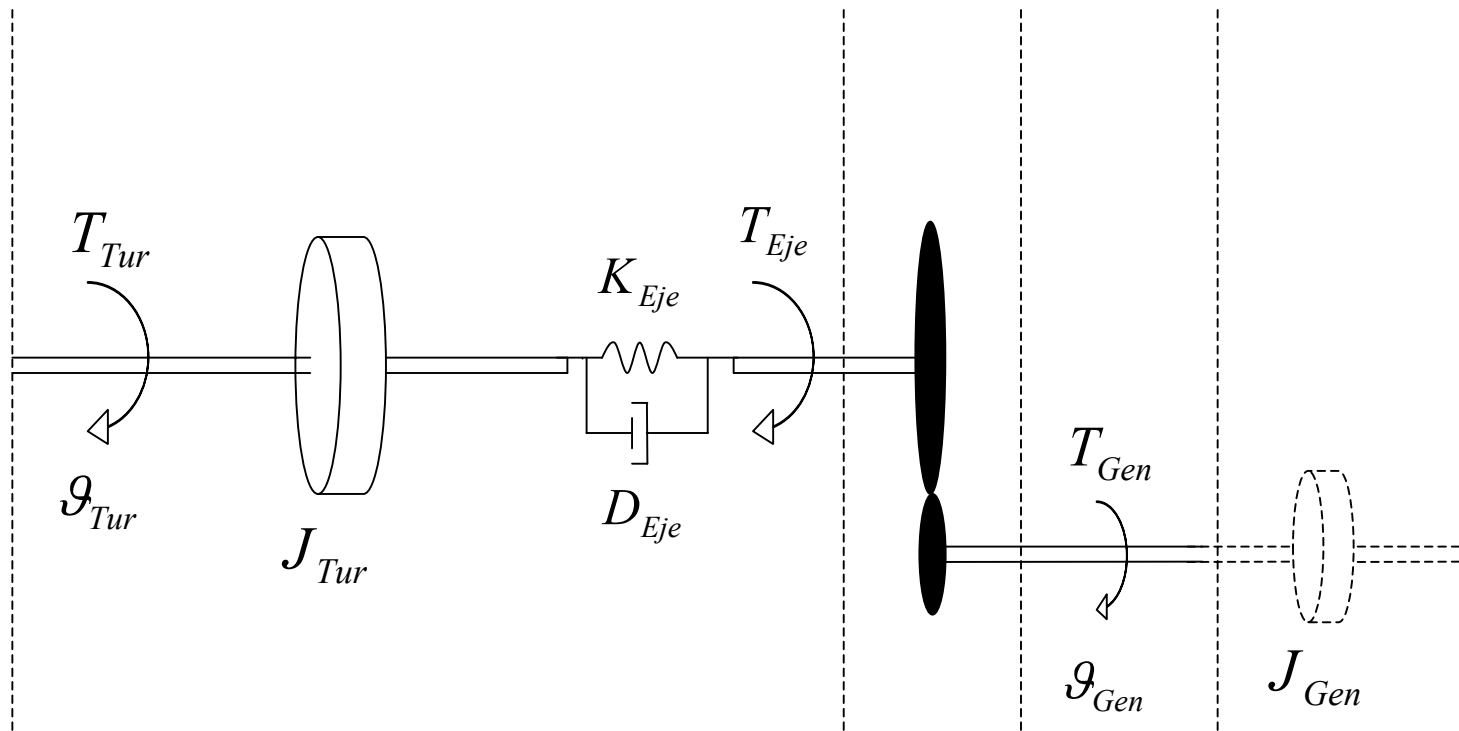
Generador síncrono: se conecta el generador a la red a través de un rectificador-inversor permitiendo que el eje gire libremente. Este sistema también permite un control de reactivos.





9.5. CALIDAD DE SUMINISTRO PARA DIFERENTES TIPOS DE GENERADORES.

La figura muestra el esquema general del modelo mecánico de un aerogenerador



Aerodinámica

Eje de baja velocidad

Caja de
engranajes

Eje de alta
velocidad



9.5. CALIDAD DE SUMINISTRO PARA DIFERENTES TIPOS DE GENERADORES.

Las tecnologías usadas en aerogeneradores se pueden resumir en:

Tipo de turbina	Perturbación al conectar a la red	Regulación de Voltaje	Flicker	Distorsión armónica	Control de reactivos
Velocidad fija / active stall-control	Moderado	No controlado	Moderado	-	Banco de condensadores
Velocidad fija / pitch-control	Moderado	No controlado	Alto	-	Banco de condensadores
Velocidad variable / generador de inducción con control de resistencia rotórica	Moderado	Controlado	Moderado	-	Banco de condensadores
Velocidad variable / generador de inducción con convertidor en el rotor	Moderado	Controlado	Bajo	Moderado	Controlado
Velocidad variable / generador conectado a través de un convertidor de potencia	Bajo	Controlado	Bajo	Moderado-Alto	Controlado