



# **INTRODUCCIÓN A LA GENERACIÓN EÓLICA**

## **ESEP**

Curso 2020

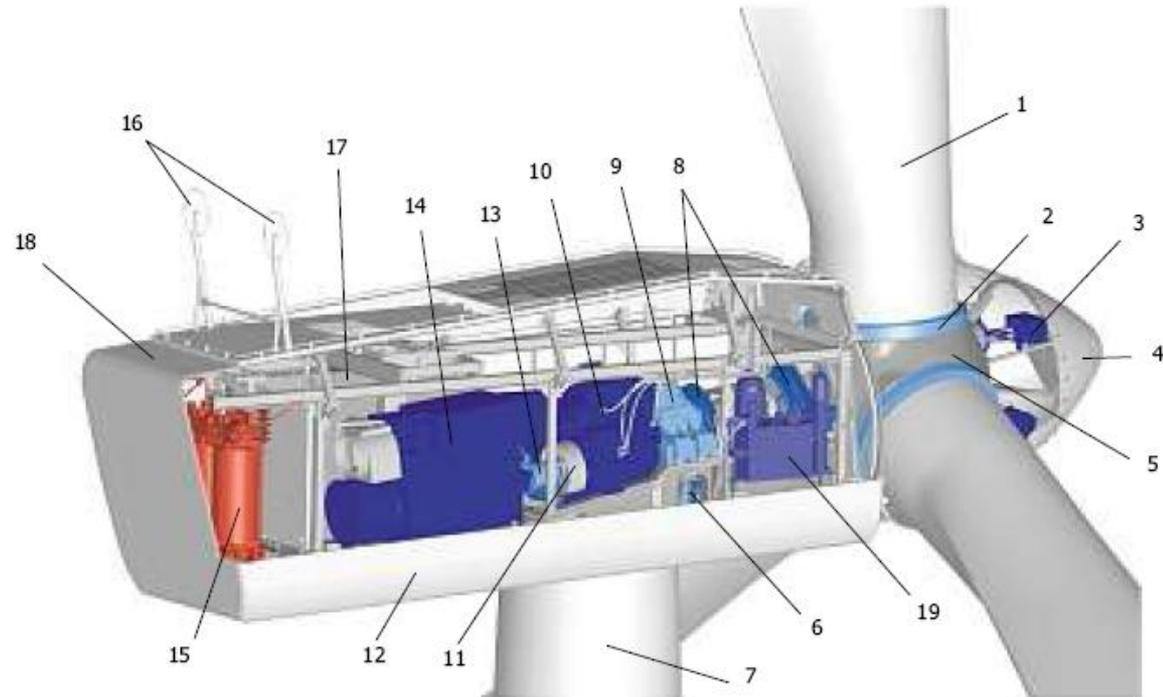
*Msc. Ing. Ignacio Afonso*



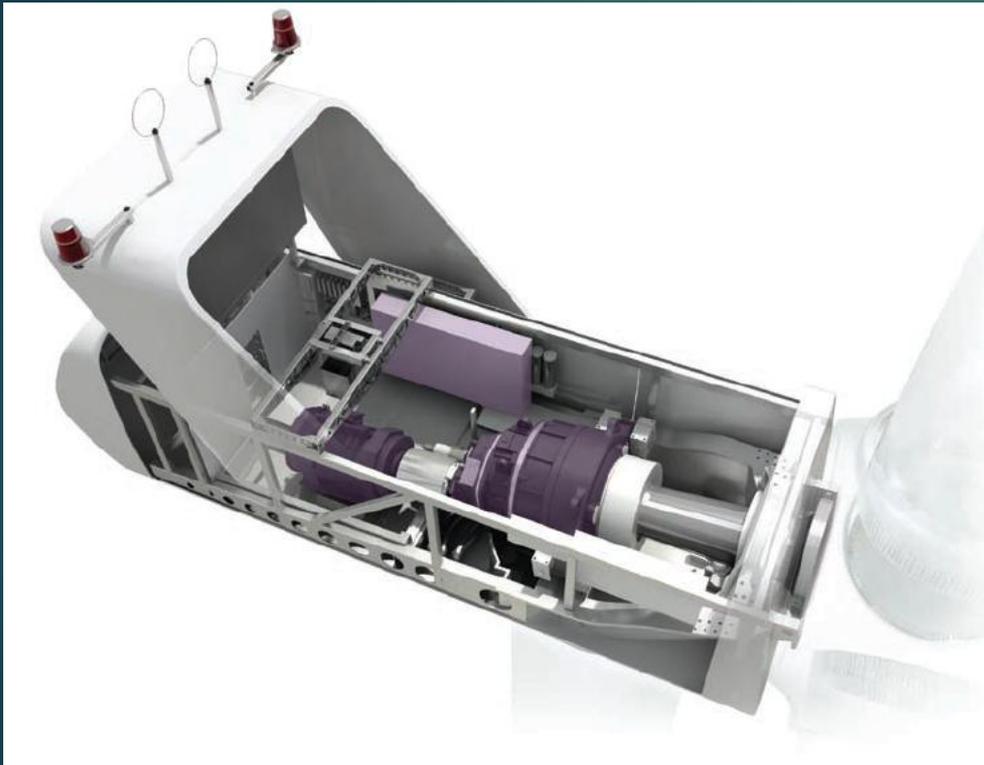
# INTRODUCCIÓN

# Topologías

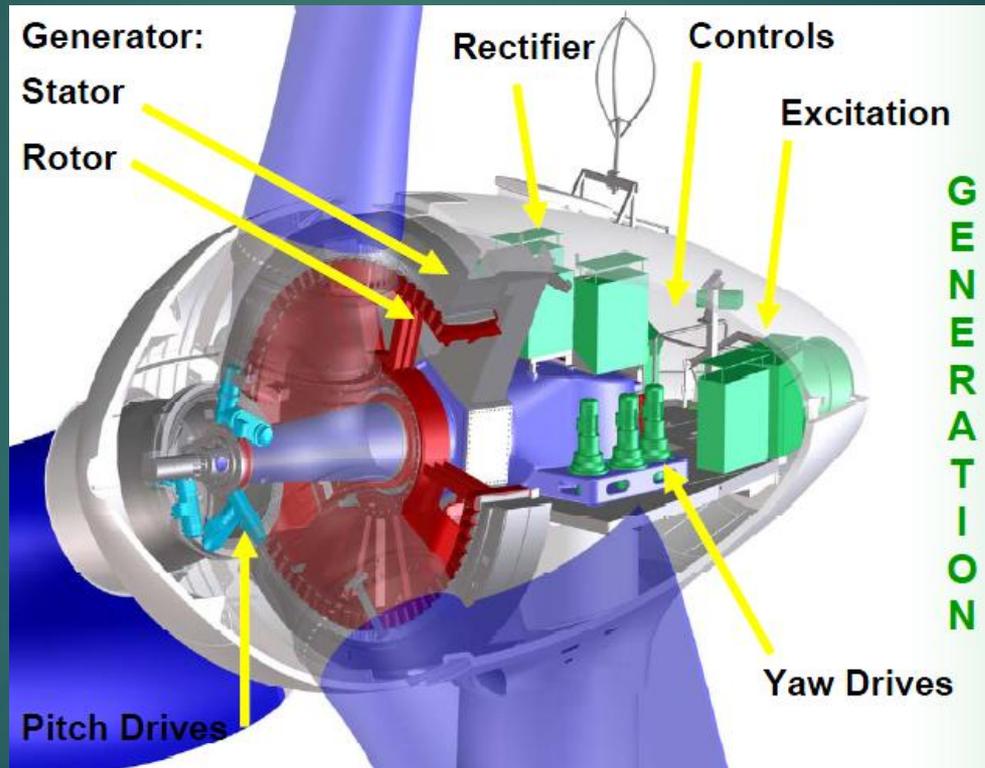
- 1** Pala
- 2** Rodamiento pala
- 3** Actuador hidráulico del pitch
- 4** Cubierta del buje
- 5** Buje
- 6** Control orientación
- 7** Torre
- 8** Eje principal con dos rodamientos
- 9** Amortiguadores
- 10** Multiplicadora
- 11** Freno de disco principal
- 12** Soporte de la nacelle
- 13** Transmisión: Eje de alta velocidad
- 14** Generador doblemente alimentado
- 15** Transformador
- 16** Anemómetro sónico y veleta
- 17** Armario de control
- 18** Cubierta de la nacelle
- 19** Unidad hidráulica



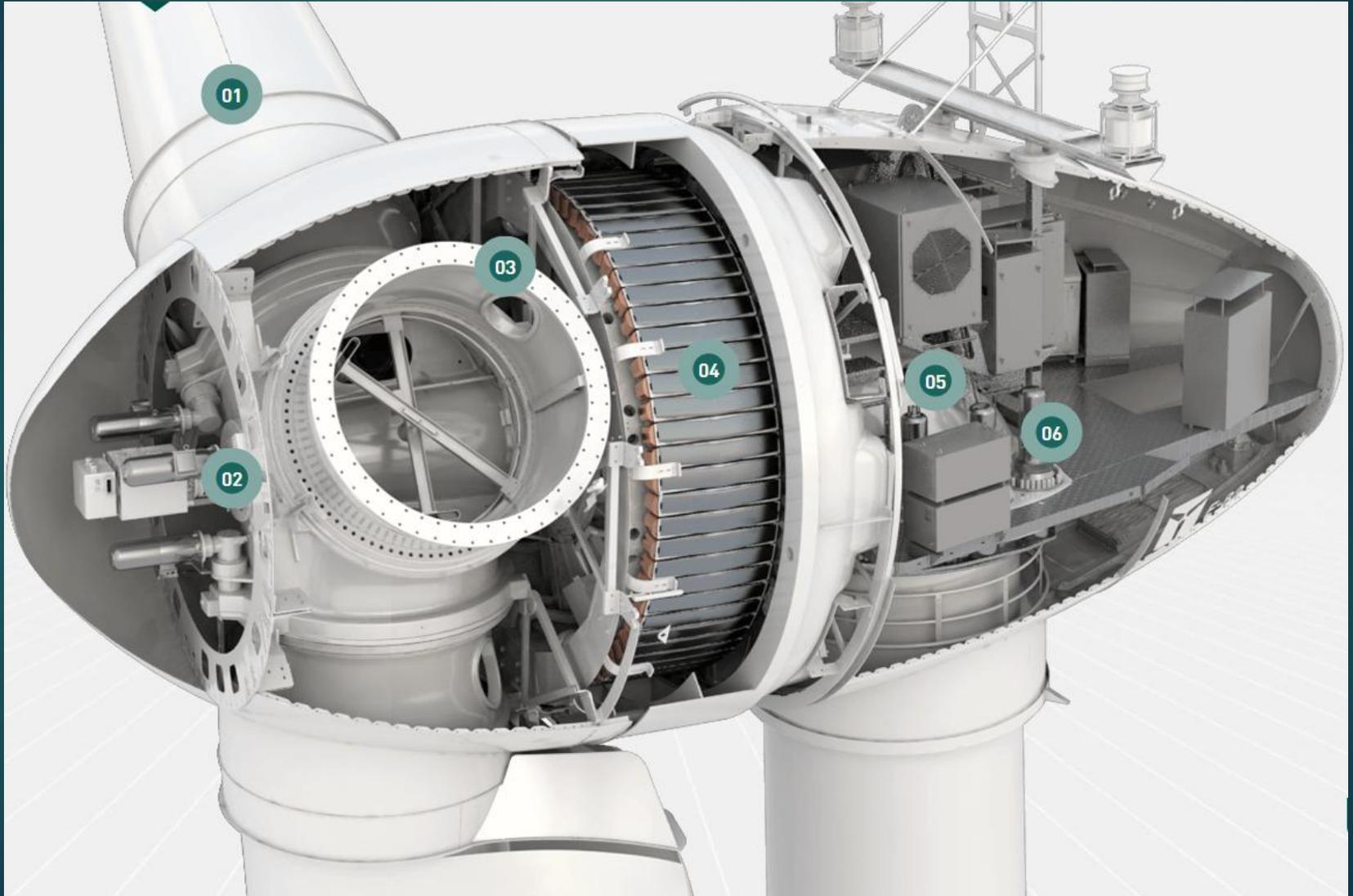
# Topologías



# Topologías



# Topologías

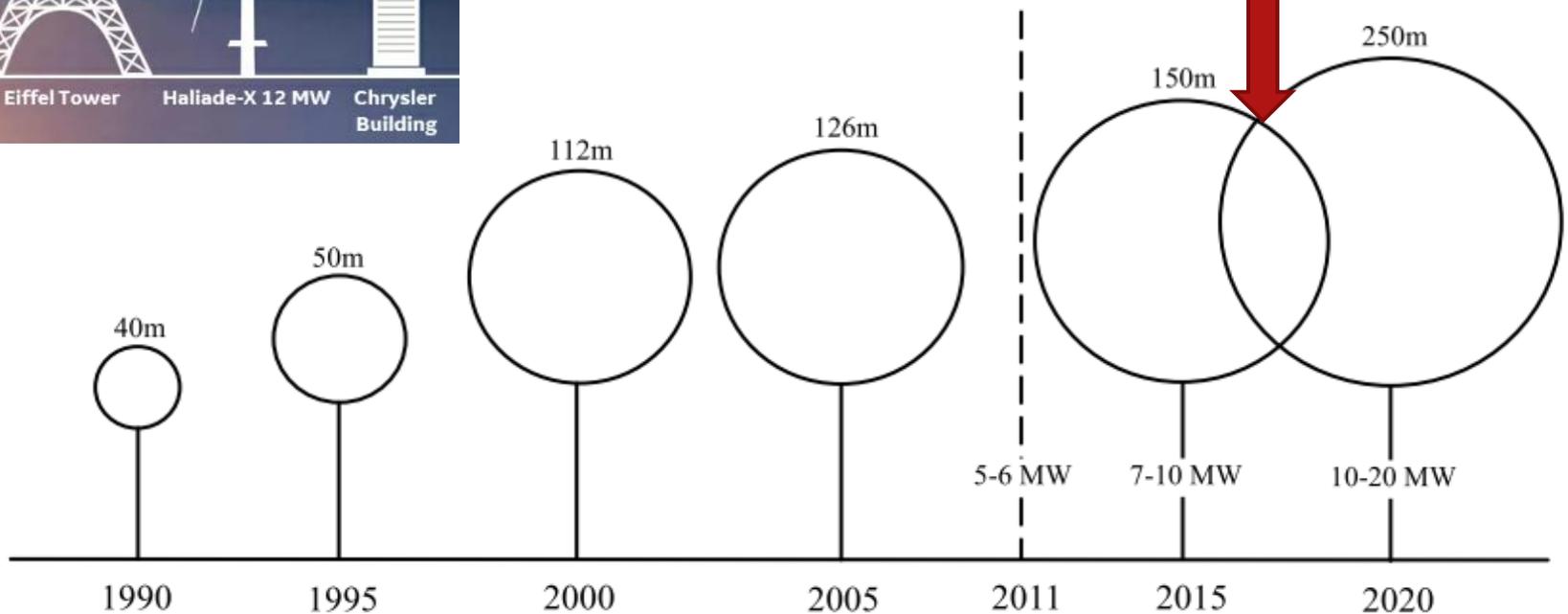


# “Tamaños”



## HOY REALMENTE ESTAMOS AQUÍ

- 193m – 10MW – SIEMENS/GAMESA
- 220m - 12MW - GE



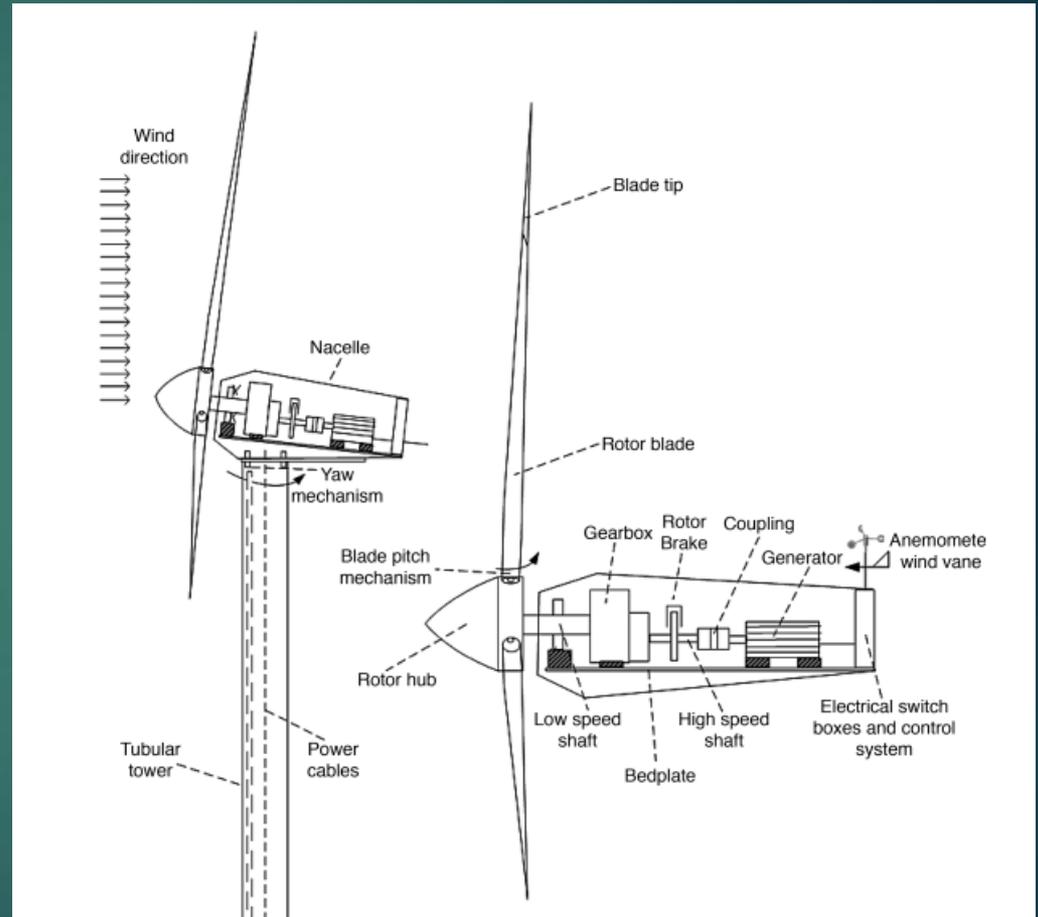
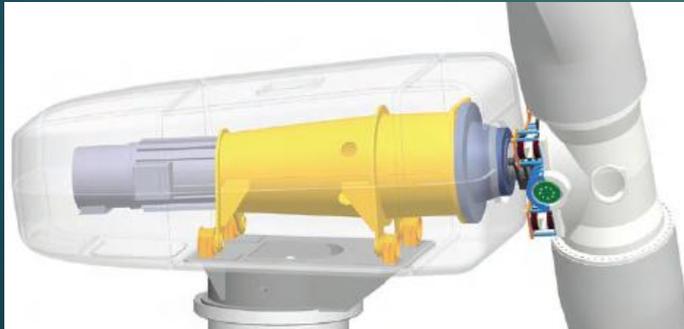
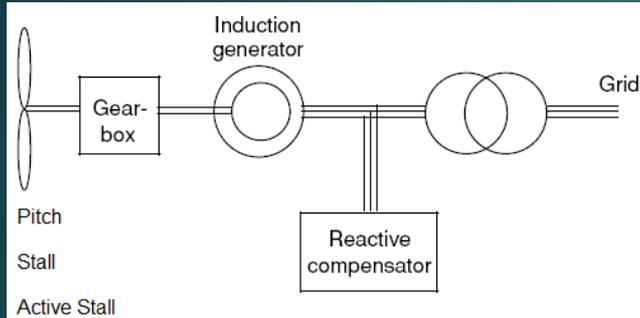
# “PESOS”

- ▶ Aerogenerador 2MW
  - ▶ Una pala: entre 6 aprox.
  - ▶ Generador: entre 5 toneladas aprox.
  - ▶ Multiplicadora: 13 toneladas aprox.
  - ▶ Total góndola: entre 62 ton.
  - ▶ Total rotor: entre 38 ton.
- ▶ **Total aprox. Sobre la torre: 100 ton.**



# AEROGENERADORES DE VELOCIDAD FIJA

# ▶ Utilizados fuertemente en los 80' y 90'



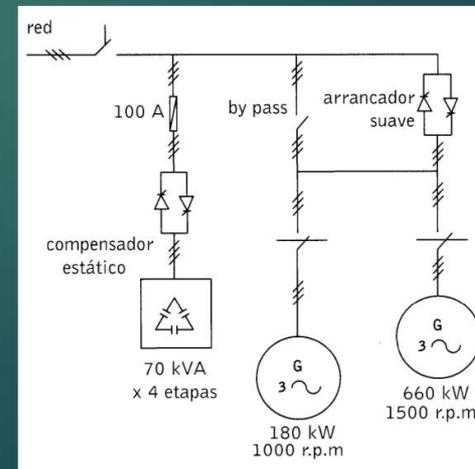
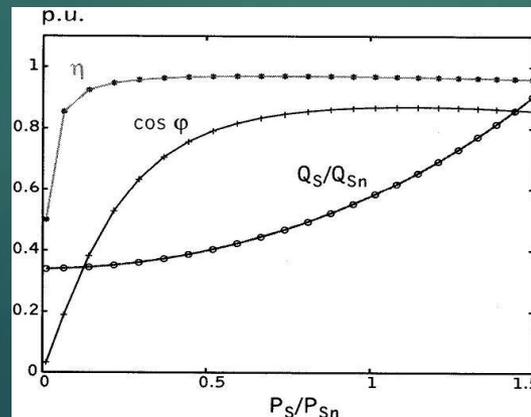
- 
- ▶ Características más comunes:
    - ▶ Generador:
      - ▶ Jaula de ardilla.
      - ▶ En algunos casos con múltiples bobinados estatóricos.
      - ▶ Potencias máximas aprox. 1500kW
    - ▶ Velocidad de giro del generador impuesta por:
      - ▶ Número de polos de la máquina.
      - ▶ Frecuencia de la red
    - ▶ Control aerodinámico:
      - ▶ Entrada en pérdida.

## ▶ Ventajas:

- ▶ Bajo costo
- ▶ Robustos (muy poco mantenimiento)
- ▶ Constructivamente simples

## ▶ Desventajas:

- ▶ Pueden generar solo para vel. superiores a la de sincronismo.
- ▶ Necesitan una caja multiplicadora.
- ▶ No tienen un buen control sobre la potencia activa generada.
- ▶ Mala calidad de energía producida.
- ▶ El generador siempre consume reactiva.





# AEROGENERADORES DE VELOCIDAD VARIABLE

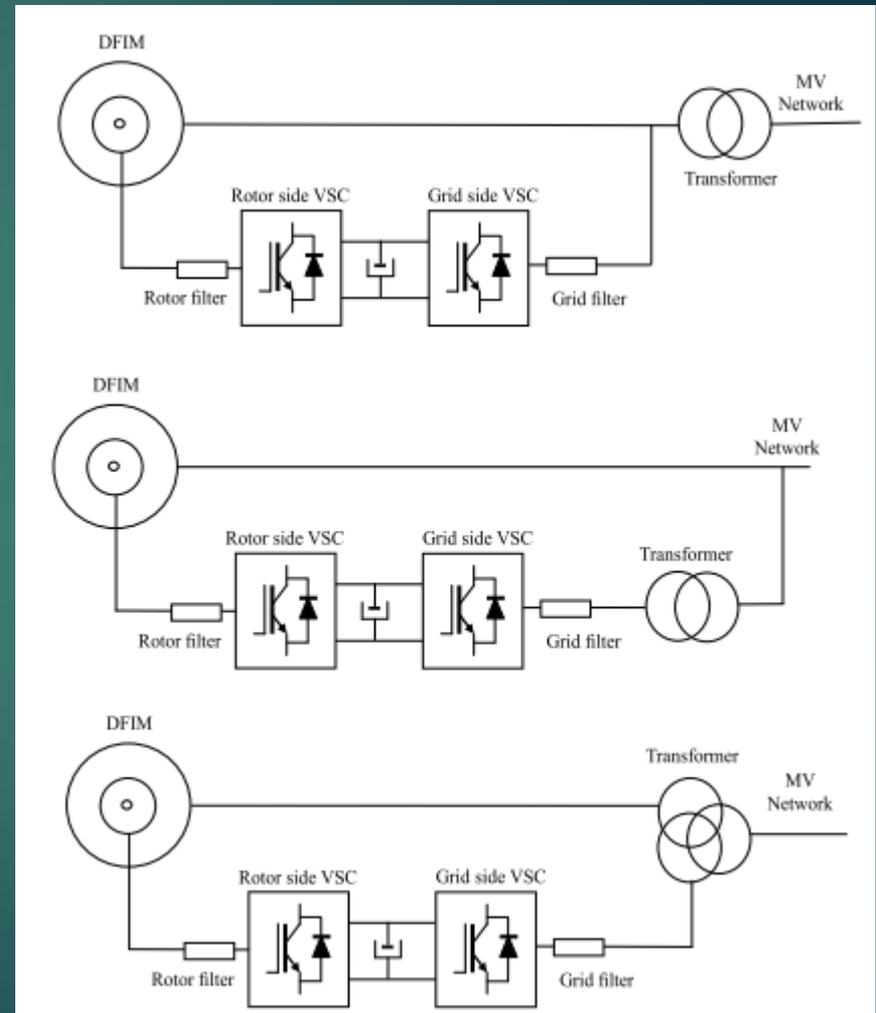
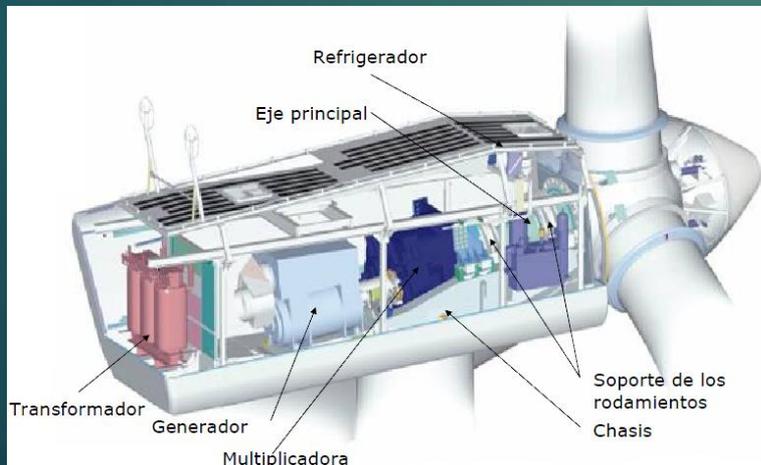
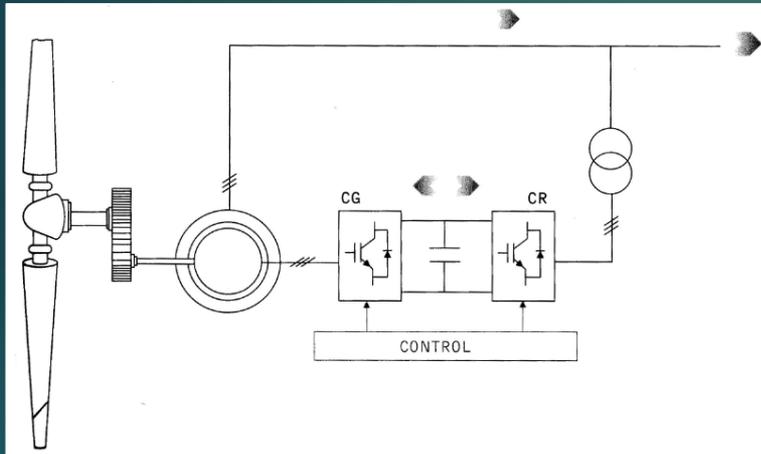
# VENTAJAS

- ▶ Permiten generar a velocidades distintas a la de sincronismo.
- ▶ Mayor aprovechamiento de la energía disponible.
- ▶ Filtran las variaciones de potencia debido a variaciones en el viento.
- ▶ Disminuyen las cargas mecánicas sobre las palas y la torre.

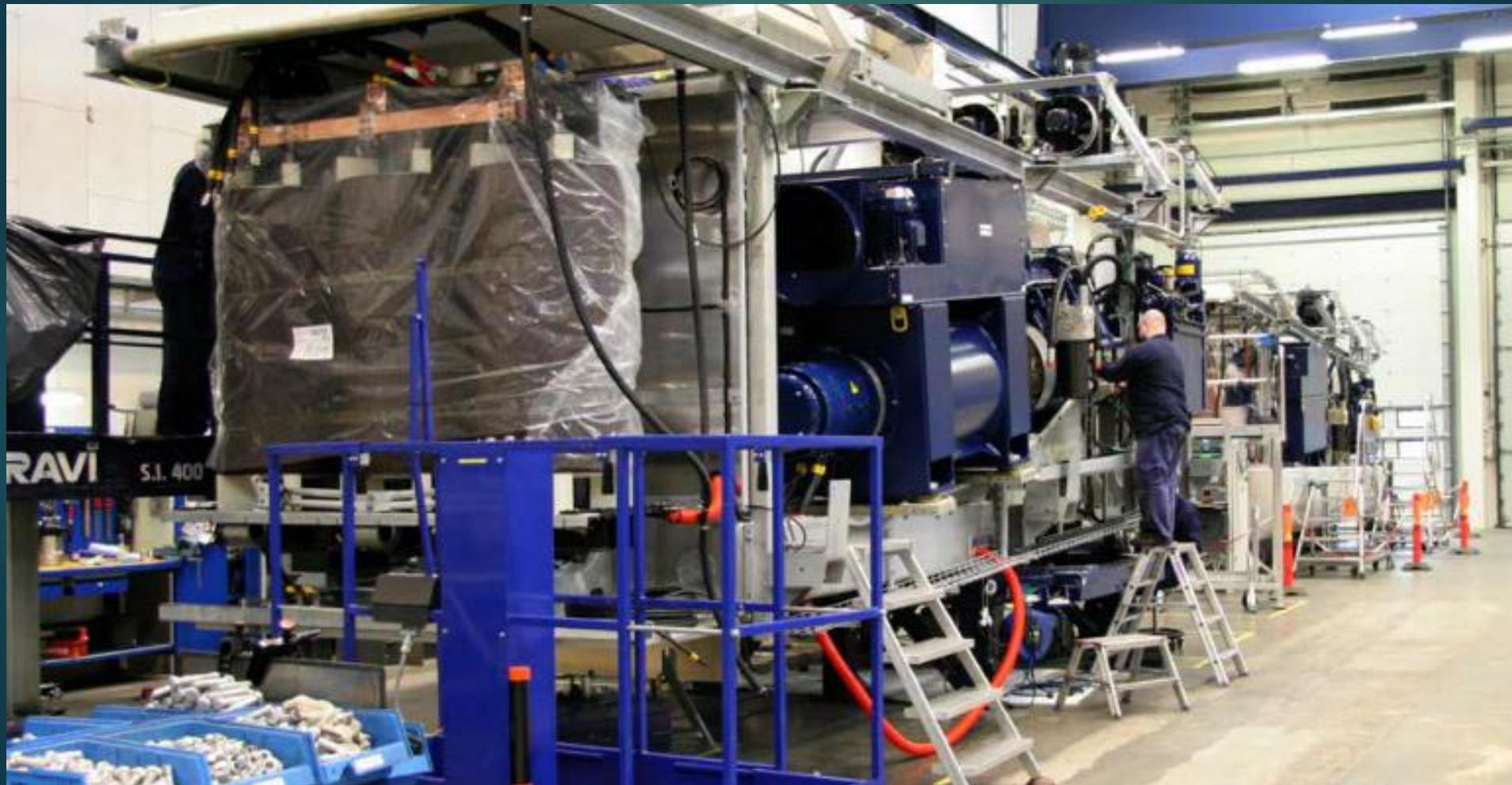
# DESVENTAJAS

- ▶ Mayor costo.
- ▶ Construcción compleja.
- ▶ Menos robusto.(del punto de vista mantenimiento)

# GENERADOR DOBLEMENTE ALIMENTADO (DFIG)



# DFIG – COMPONENTES TRANSFORMADOR



# GENERADOR DOBLEMENTE ALIMENTADO

## ■ Características:

- Rotor y estator bobinados.
- Genera a tensión y frecuencia constantes en un margen aprox. -30% +30% respecto a la velocidad de sincronismo.
- Permite controlar tanto potencia activa como reactiva generada.
- Electrónica de potencia de escala media (20% y 30% de la pot. nominal de la máquina).

# Convertidor AC/DC - DC/AC

## ▶ **Convertidor conectado al generador:**

- ▶ Se encarga de realizar el control vectorial de la máquina. El mismo permite controlar la potencia activa generada así como el factor de potencia.
- ▶ Controla amplitud, frecuencia y fase de la tensión aplicada al rotor.
- ▶ Frecuencia:  $f_{\text{rotórica}} + f_{\text{mecánica}} = f_{\text{estatórica}}$
- ▶ Permite la circulación de la potencia desde y hacia el rotor.

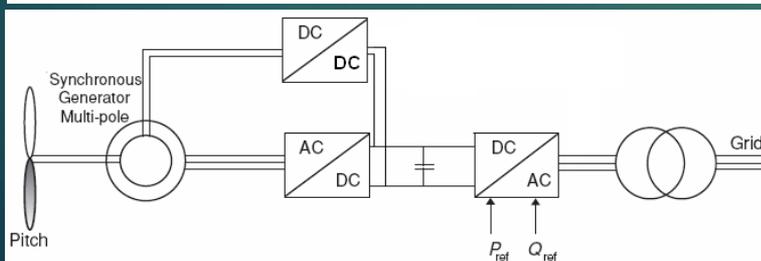
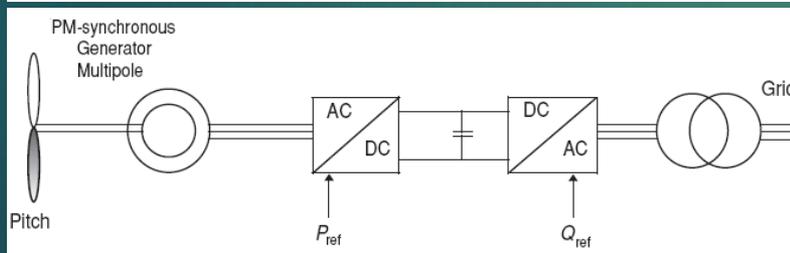
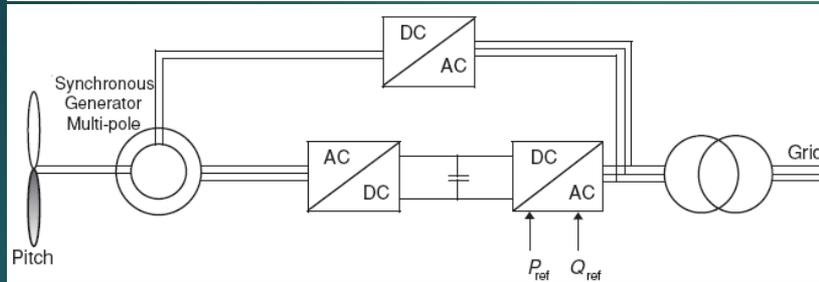
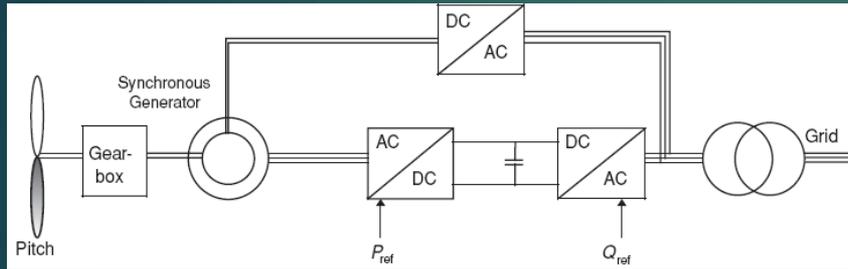
# Convertidor AC/DC-DC/AC

- ▶ **Convertidor conectado a la red:**
  - ▶ No es parte del control de potencia de la máquina.
  - ▶ Permite la regulación del factor de potencia.
  - ▶ Mantiene constante la tensión en el bus de continua.

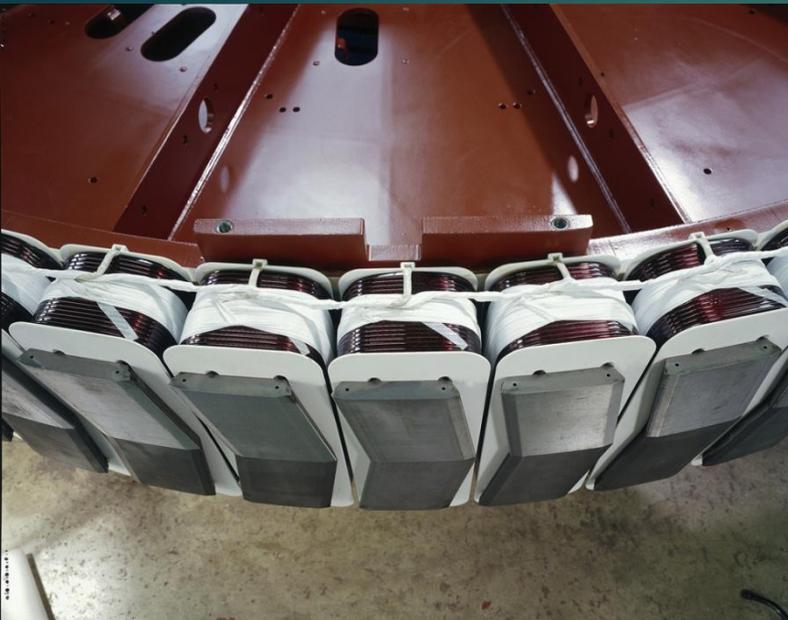
# Balance de potencias según el deslizamiento “g”

- ▶ Régimen supersíncrono ( $g < 0$ )
  - ▶  $P_{rot}$  saliente de la máquina.
  - ▶  $P_{est}$  saliente de la máquina.
- ▶ Régimen subsíncrono ( $g > 0$ )
  - ▶  $P_{rot}$  entrante a la máquina
  - ▶  $P_{est}$  saliente a la máquina

# Generadores síncronos



# COMPONENTES GENERADOR SINCRÓNICO - FULL CONVERTER



# COMPONENTES GENERADOR SINCRÓNICO - FULL CONVERTER



# Generadores síncronos

- ▶ Características:
  - ▶ Control sobre potencia activa y reactiva.
  - ▶ Control sobre la frecuencia.
  - ▶ Toda la potencia que genera la máquina atraviesa el convertidor.
    - ▶ Convertidor más costoso.
    - ▶ Mayores pérdidas en el convertidor.
  - ▶ En general mejores prestaciones que los doblemente alimentados.

# Generadores síncronos

- ▶ Características:
  - ▶ Según diseño pueden prescindir de caja multiplicadora. (máquinas multipolares)
  - ▶ Coste más elevado.

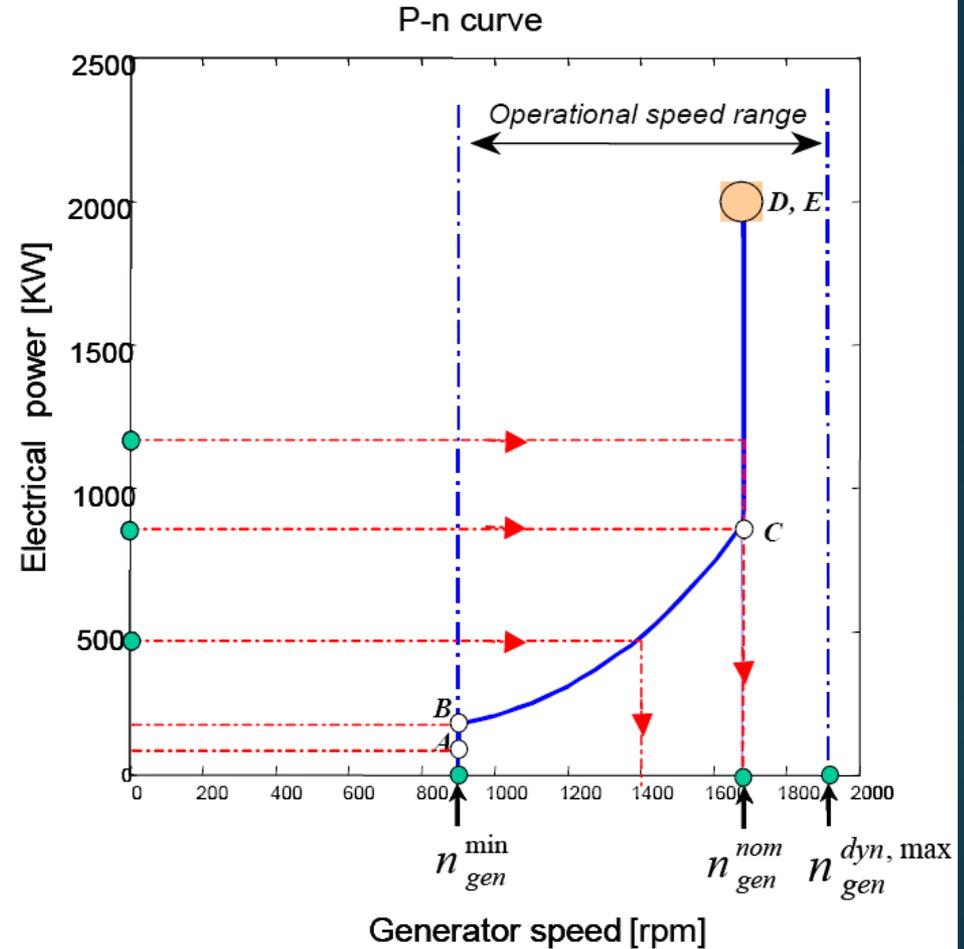
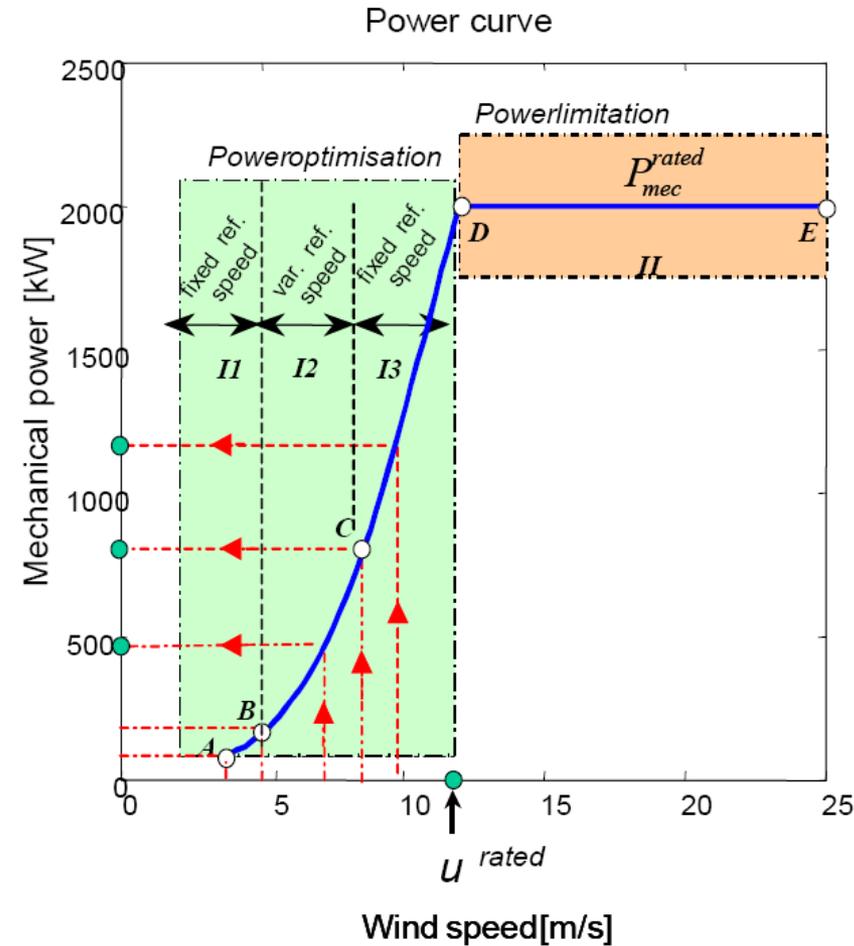
# Generadores síncronos de Imanes Permanentes

- ▶ Características “extras”:
  - ▶ No tienen pérdidas por efecto Joule en el rotor.
  - ▶ No necesita anillos rozantes.
  - ▶ Menor tamaño (reducción del paso polar)
  - ▶ Coste de imanes elevado.
  - ▶ Manipulación de imanes compleja.
  - ▶ Peligro de desmagnetización por temperatura.
  - ▶ No hay control sobre la excitación.

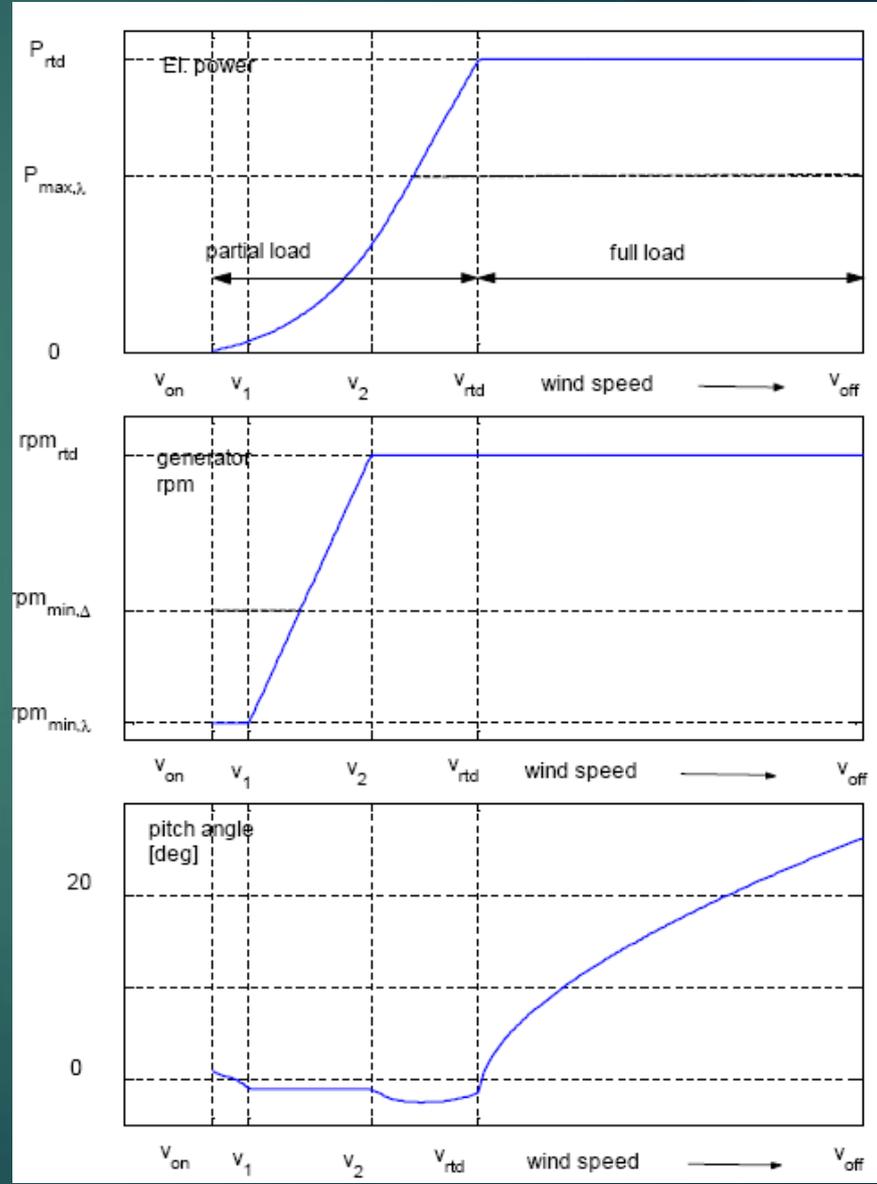
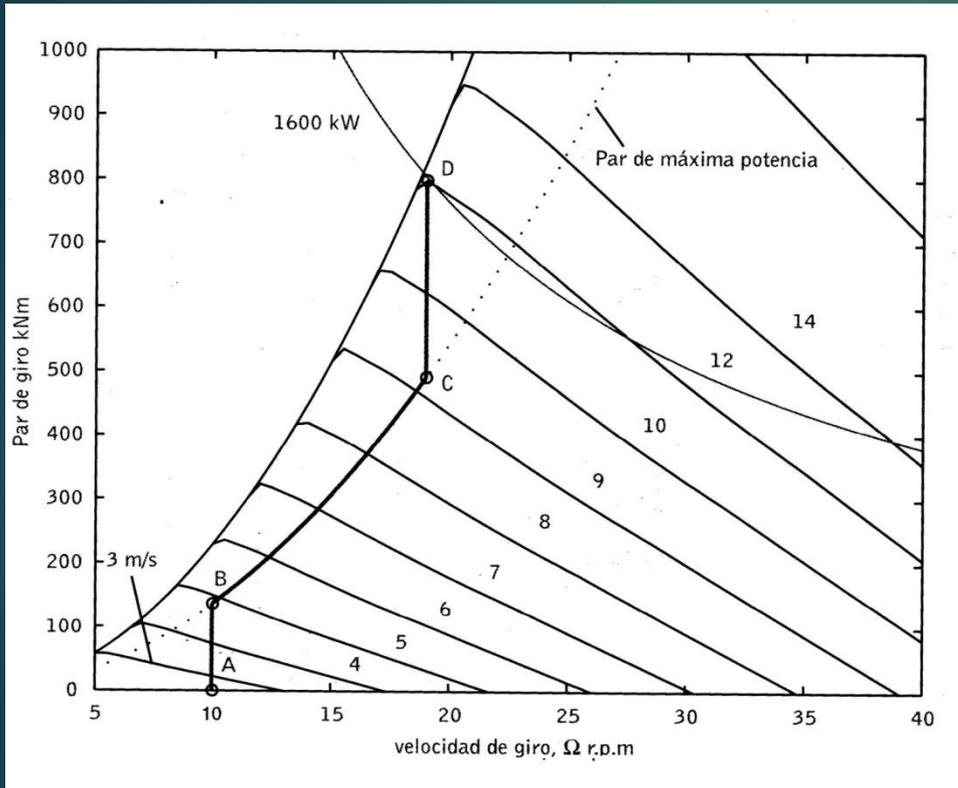


# OPERACIÓN DE AEROGENERADORES DE VELOCIDAD VARIABLE

# Control de Velocidad-Potencia



# Control de Velocidad-Potencia





# SISTEMA DE CONTROL AERODINÁMICO

# ¿PARA QUÉ?

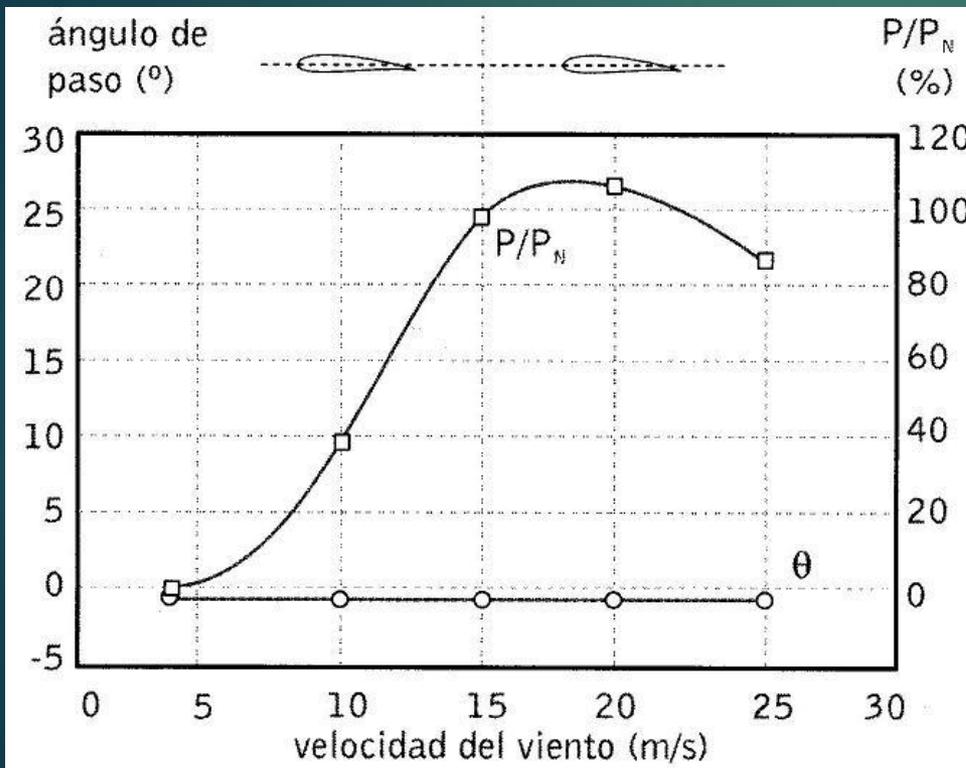
- ▶ Proteger al aerogenerador ante vientos elevados.
- ▶ Regular la potencia generada por el mismo.(control lento)

# ¿COMO?

- ▶ Modificando el ángulo de ataque de las palas
- ▶ Dos formas:
  - ▶ De forma pasiva
    - ▶ Entrada en pérdida aerodinámica.
  - ▶ De forma activa
    - ▶ Control de cambio de paso  
(variando el ángulo de la pala en dirección al viento)
    - ▶ Pérdida aerodinámica activa  
(variando el ángulo de la pala en sentido contrario)

# ¿COMO?

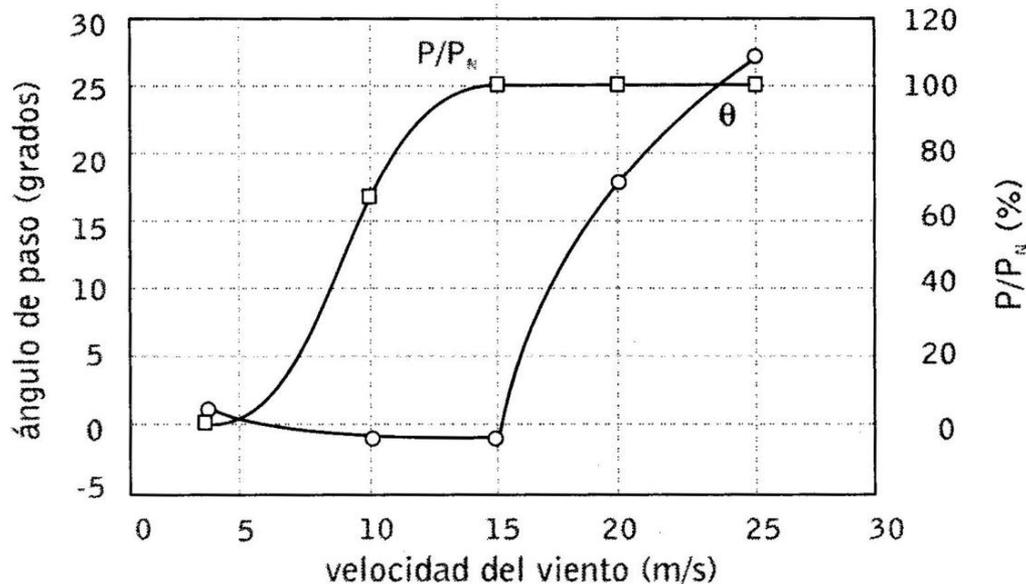
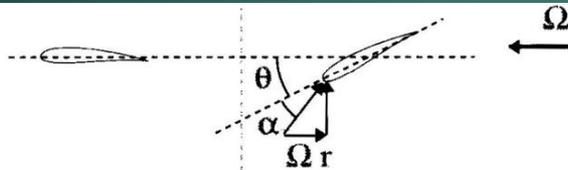
- ▶ Entrada en pérdida aerodinámica.



- Ángulo de paso fijo (sintonizado según el emplazamiento).
- Sobretiro en potencia generada.
- Genera mayores cargas mecánicas.
- La curva de potencia puede cambiar con las estaciones. (Temp.  $\uparrow$   $\rightarrow$  Densidad  $\downarrow$   $\rightarrow$  Pot.  $\downarrow$ )
- Utilizado en máquinas de vel. fija.

# ¿COMO?

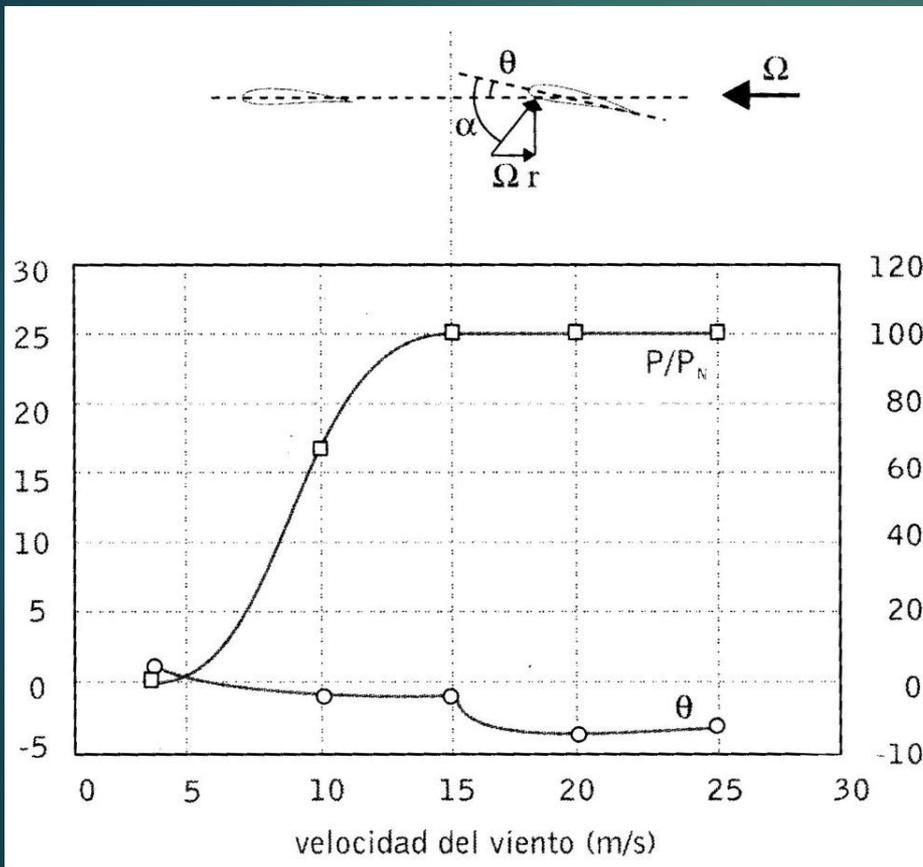
- ▶ Cambio de paso/pitch.



- Ángulo de paso variable.
- Permite limitar la velocidad de giro.
- Permite ampliar el rango de velocidades de viento en el cual la máquina opera.
- Mejora el desempeño en los arranques y paradas.
- “La máquina podría compensar la variación en la densidad del aire.”

# ¿COMO?

- ▶ Entrada en pérdida activa.



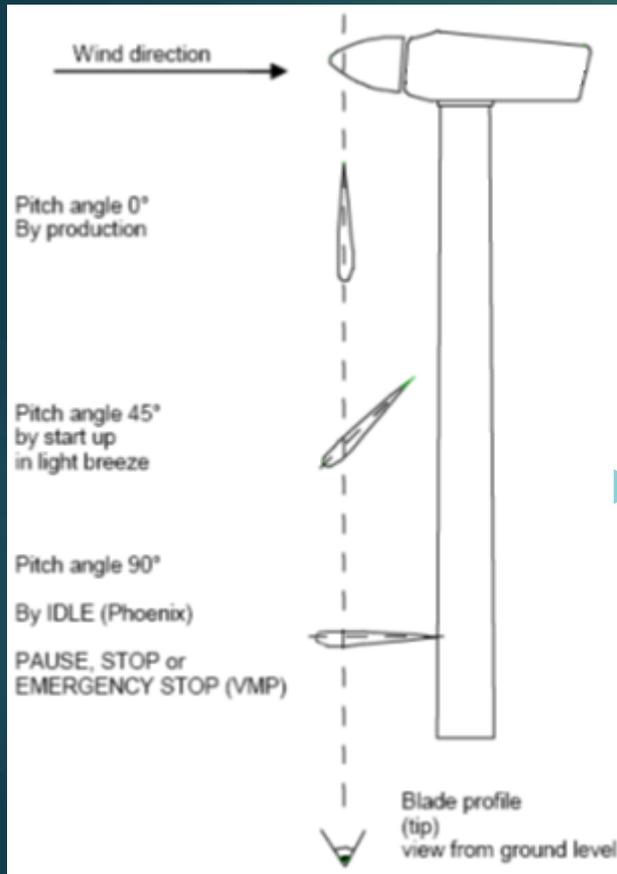
- ▶ Ángulo de paso variable.
- ▶ Permite limitar la velocidad de giro.
- ▶ Permite ampliar el rango de velocidades de viento en el cual la máquina opera.
- ▶ Exige mecánicamente más a la máquina.

# Sistema de Pitch

## ► Funciones:

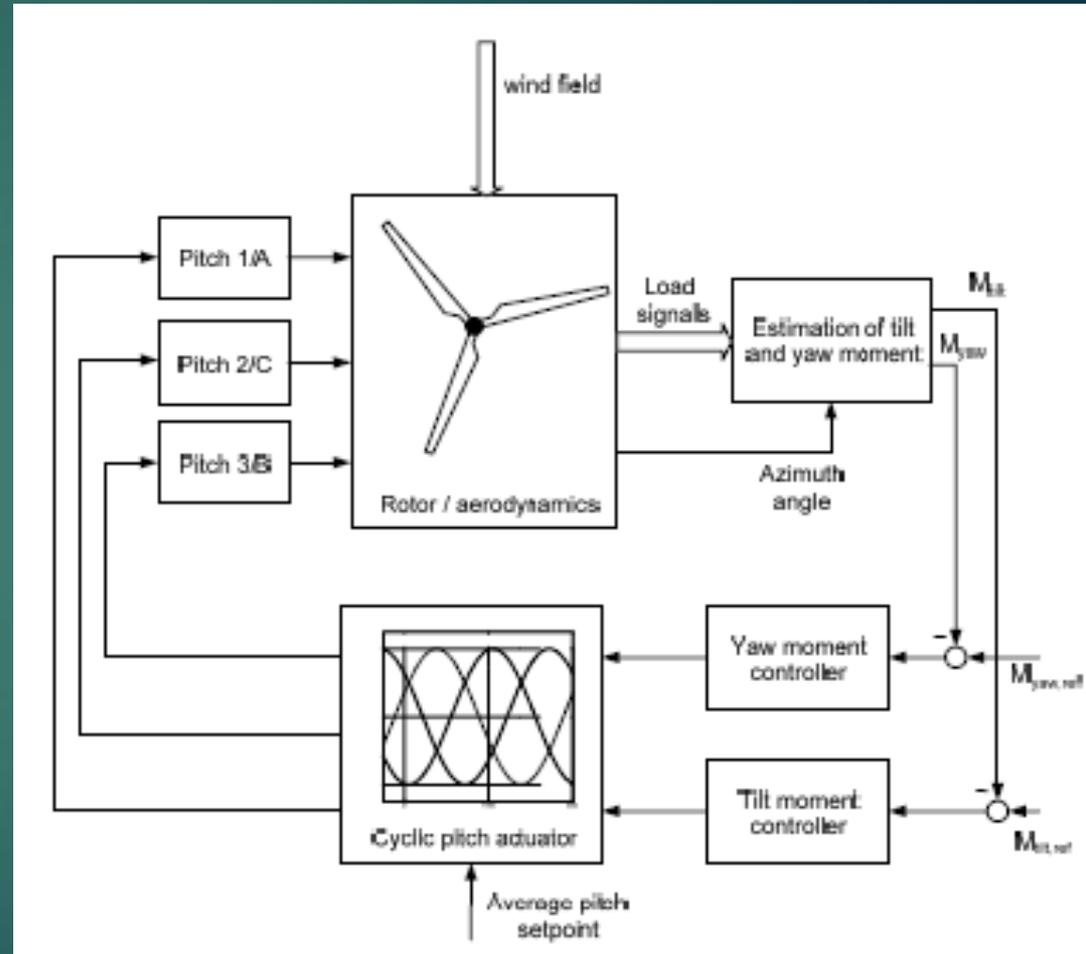
- Ajustar el ángulo de las palas según la velocidad del viento, la potencia y la estrategia de control.
- Sistema primario de frenado.
- En ciertos modelos limitar cargas mecánicas debido a cargas no simétricas en el rotor.

► Velocidad máxima: aprox.  $10^{\circ}/\text{seg}$  (parada de emergencia)

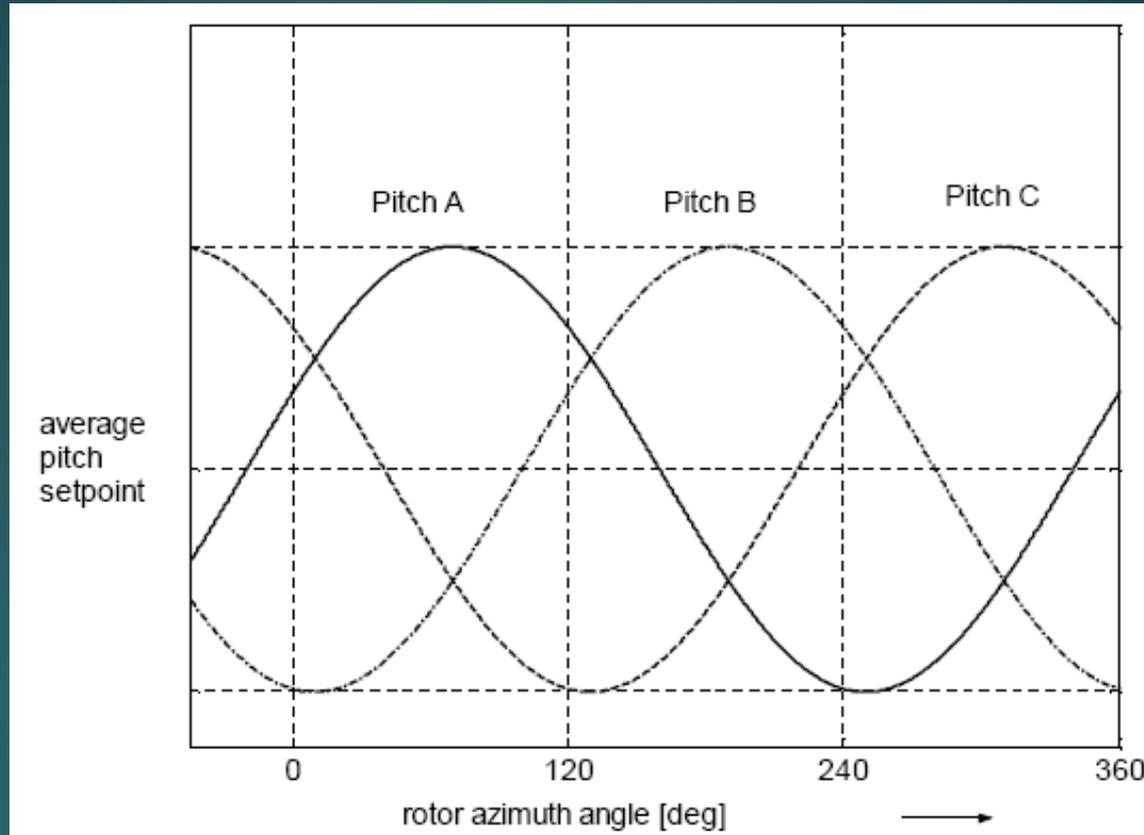


# Sistema de Pitch

- ▶ Pitch individual :
  - ▶ Detecta las cargas mecánicas en cada pala.
  - ▶ Estima el momento de "Tilt" y el momento de "Yaw"
  - ▶ Determina el "ciclo de pitch" a cumplir por cada pala.



# Sistema de Pitch



- ▶ Típico comportamiento del sistema de Pitch individual.
- ▶ Variaciones habituales entre  $\pm 2^\circ$  y  $\pm 5^\circ$



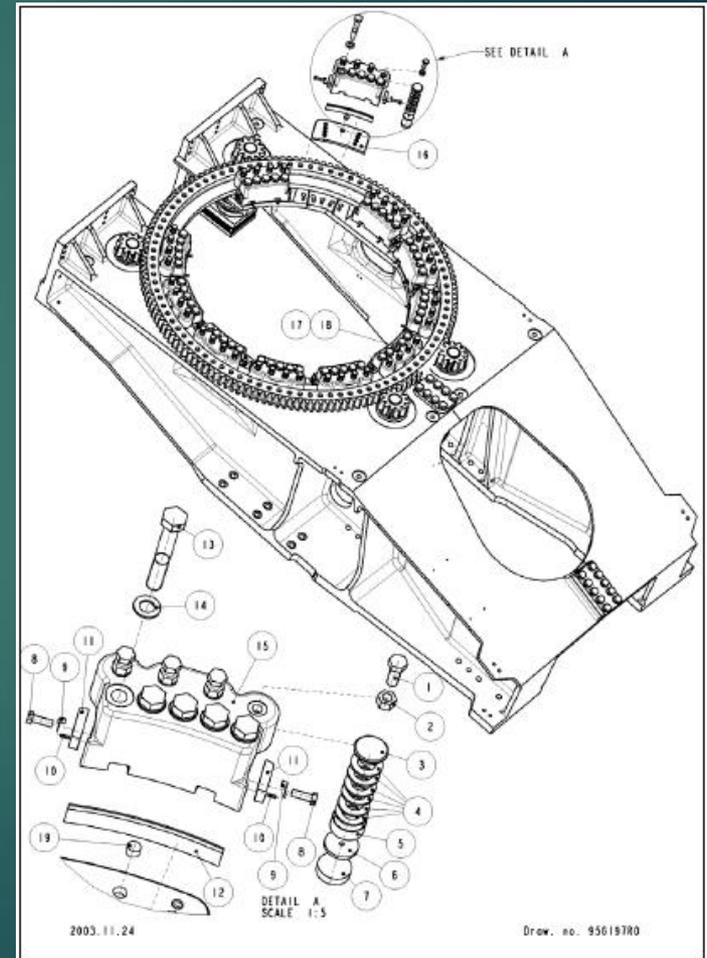
# SISTEMA DE CONTROL DE YAW

# Sistema de Yaw

## ▶ Función:

- ▶ Mantener la turbina enfrentada a la dirección del viento.
- ▶ Desenrollar los cables.
  - ▶ El sistema de Yaw registra la posición de la góndola respecto a  $0^\circ$ .
  - ▶ Para giros menores o iguales de 1.8 vueltas el sistema funciona normalmente. (no necesita “desenrollar”)
  - ▶ Si el aerogenerador no esta produciendo y el sistema de Yaw registra un giro entre 1.8 y 3.8 vueltas →→ comienza a “desenrollar”.
  - ▶ Si el aerogenerador esta produciendo espera a alcanzar los 3.8 vueltas →→ detiene el sistema de Yaw y comienza a “desenrollar”.
  - ▶ Tiempo estimado:  $0.42^\circ/\text{seg}$  → aprox. 14 minutos 1 vuelta

# Sistema de Yaw





CAPACIDADES ACTUALES

Y

GRID CODE'S

# Huecos de tensión

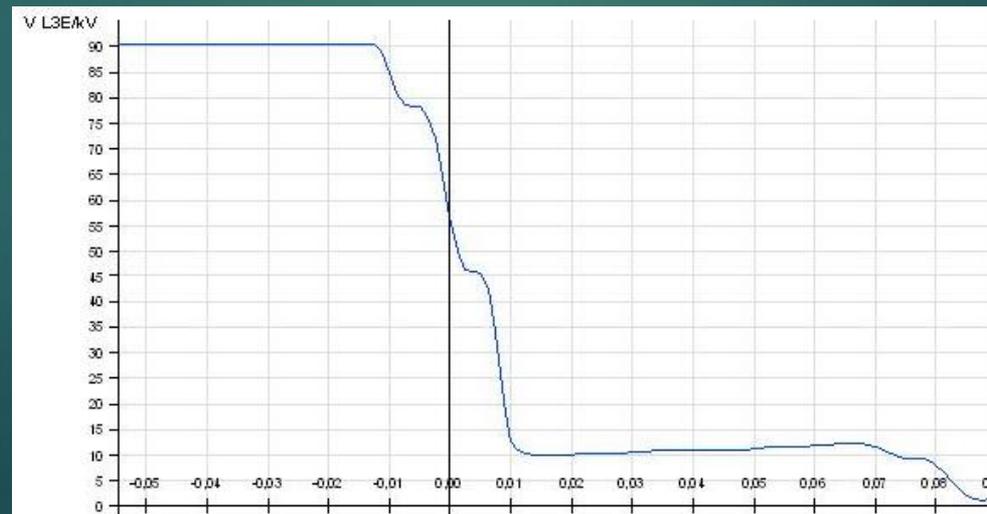
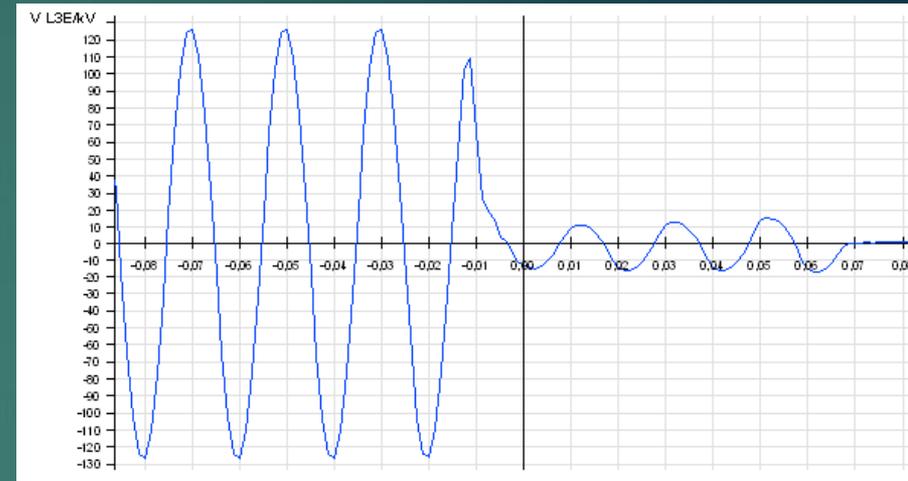
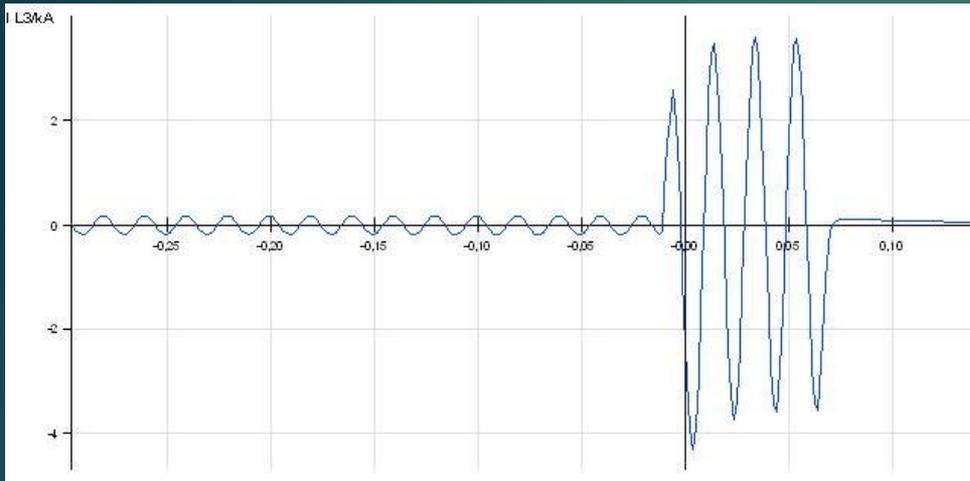
## ➤ **Definición (REE, P.O. 12.3):**

- ▶ “Es una disminución brusca de la tensión seguida de su restablecimiento después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura entre 10ms y 1 minuto.”

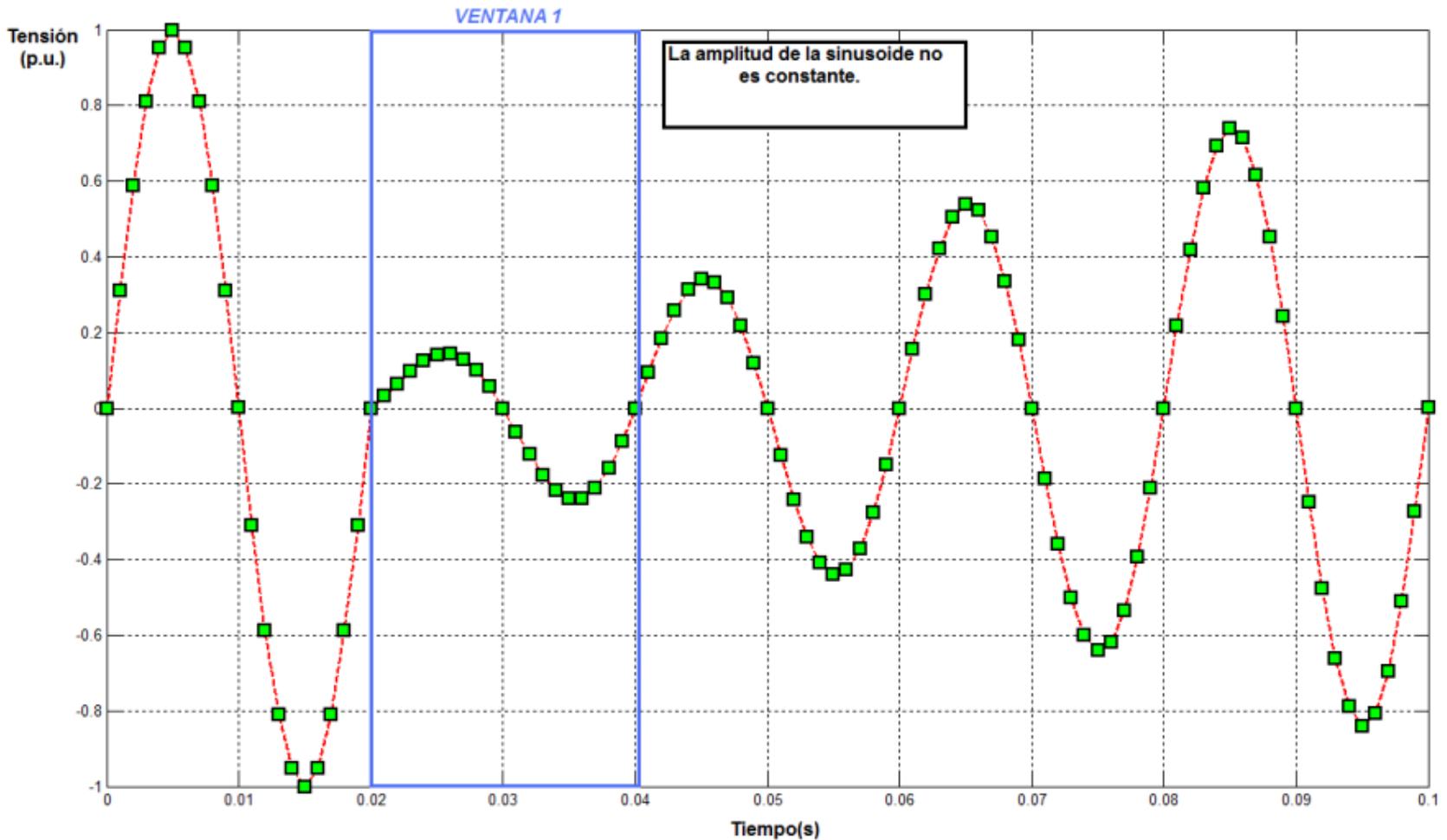
## ➤ **Origen:**

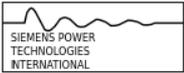
- ▶ A nivel de la red de transmisión los huecos de tensión son consecuencia de la ocurrencia de un cortocircuito.

# Como se ve un HdT (Registro osciloscófico)



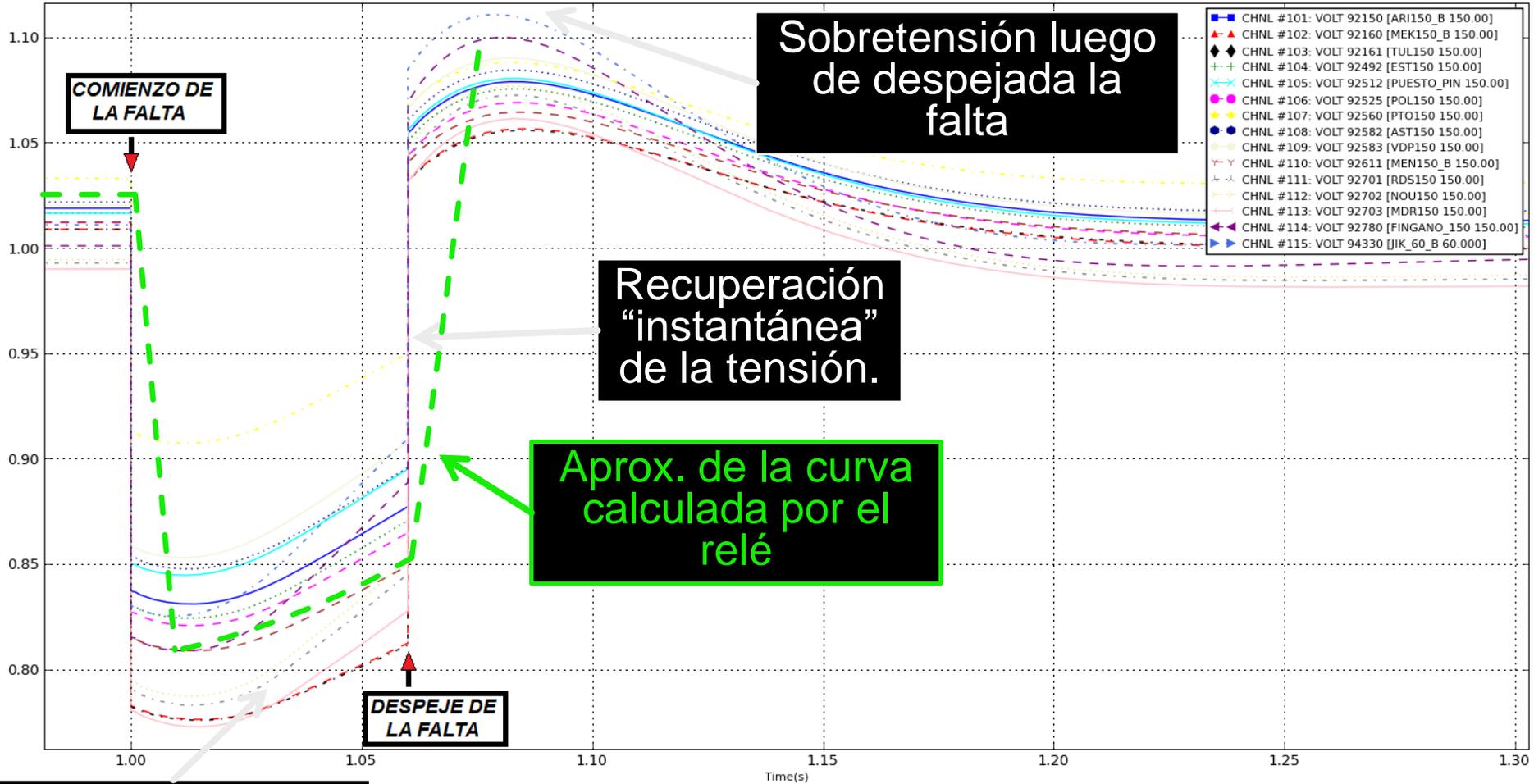
# Cálculo del valor RMS





RED 2017  
MAXIMO, GEN: 50% RN + 100% EOL + CBO 6TA + 50% SGU, RESERVA  
corto1.out

TENSIONES PE



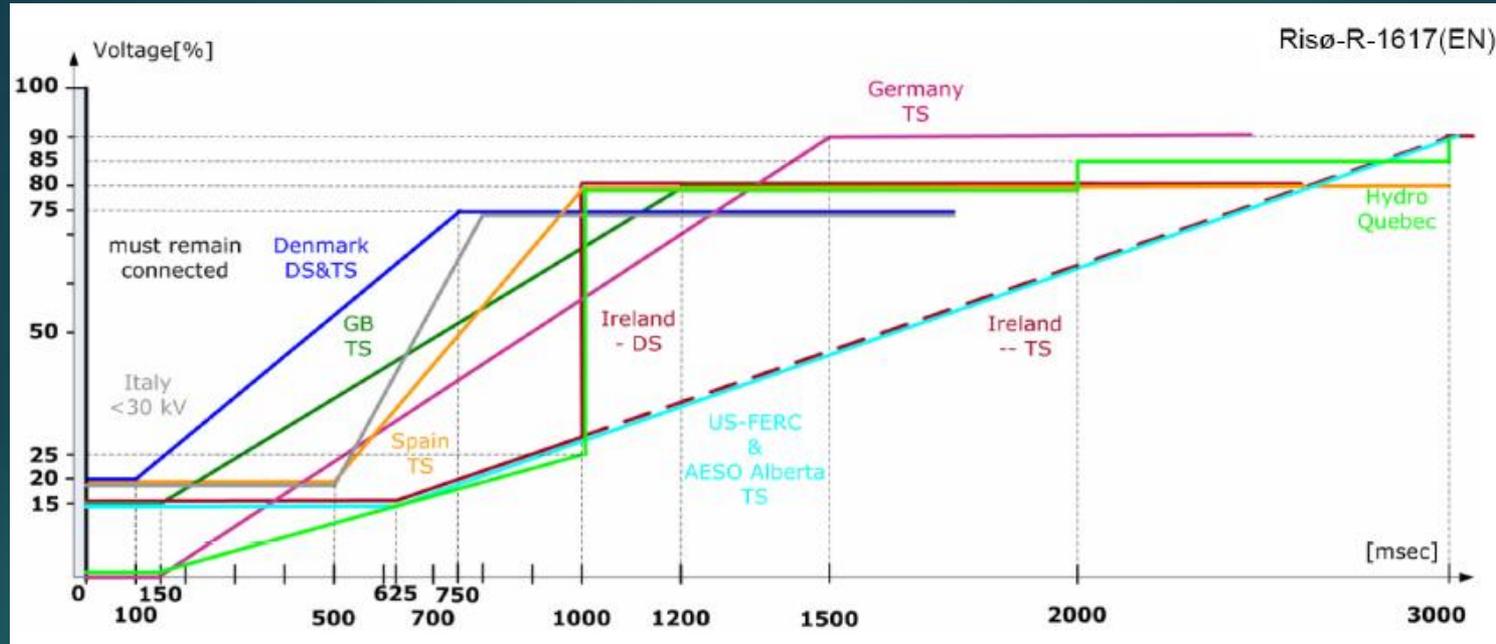
Recuperación  
debido a la  
inyección de Q.

# Huecos de tensión

## ¿Por que “soportar” el hueco?

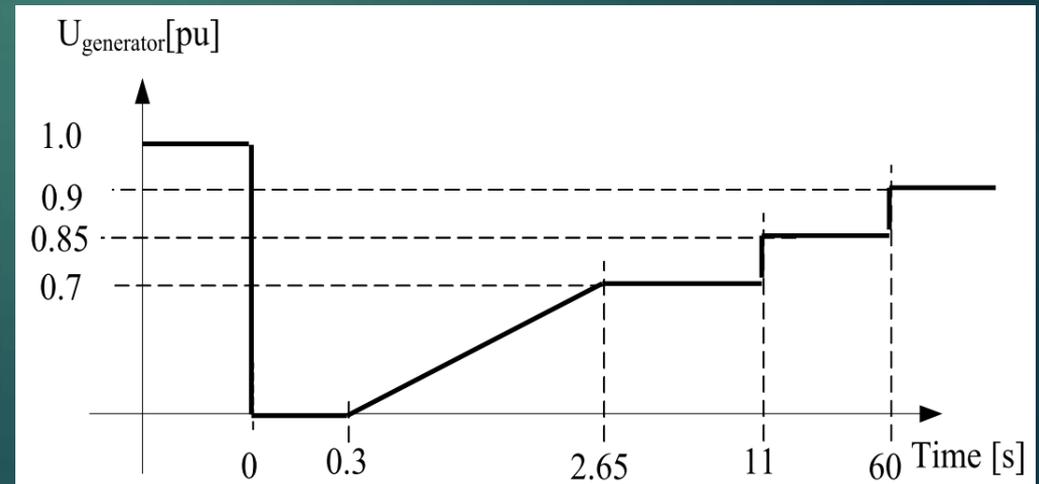
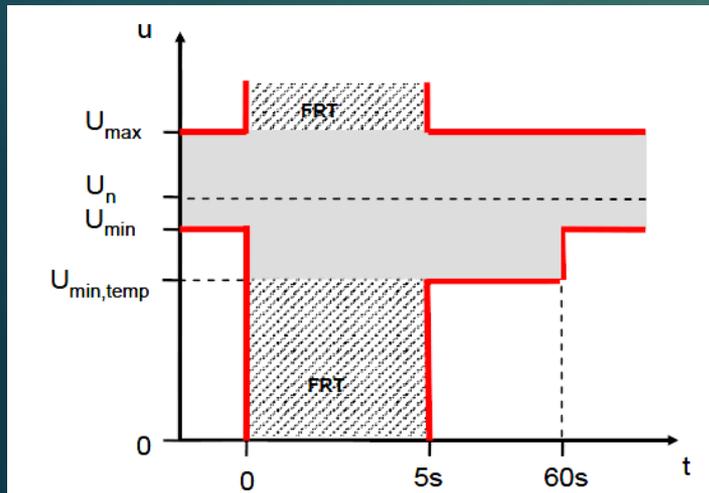
- ▶ En los 90 se exigía la desconexión.
- ▶ Actualmente deben permanecer conectados durante ciertos huecos de tensión.(mayor cantidad de aerogeneradores, cambio de tecnologías)
- ▶ Evitar problemas de estabilidad, tanto transitoria como de tensión..

# ► Capacidad de soportar huecos de tensión



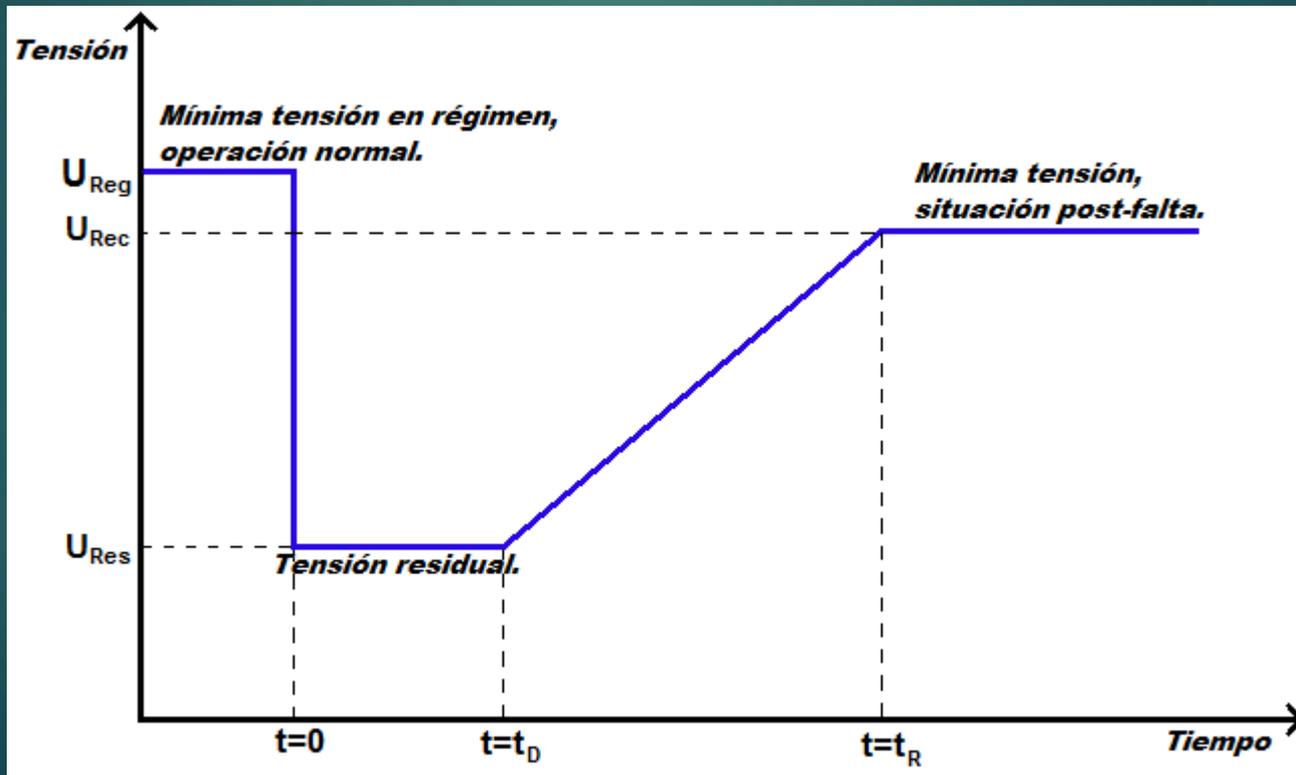
Full Converter

DFIG



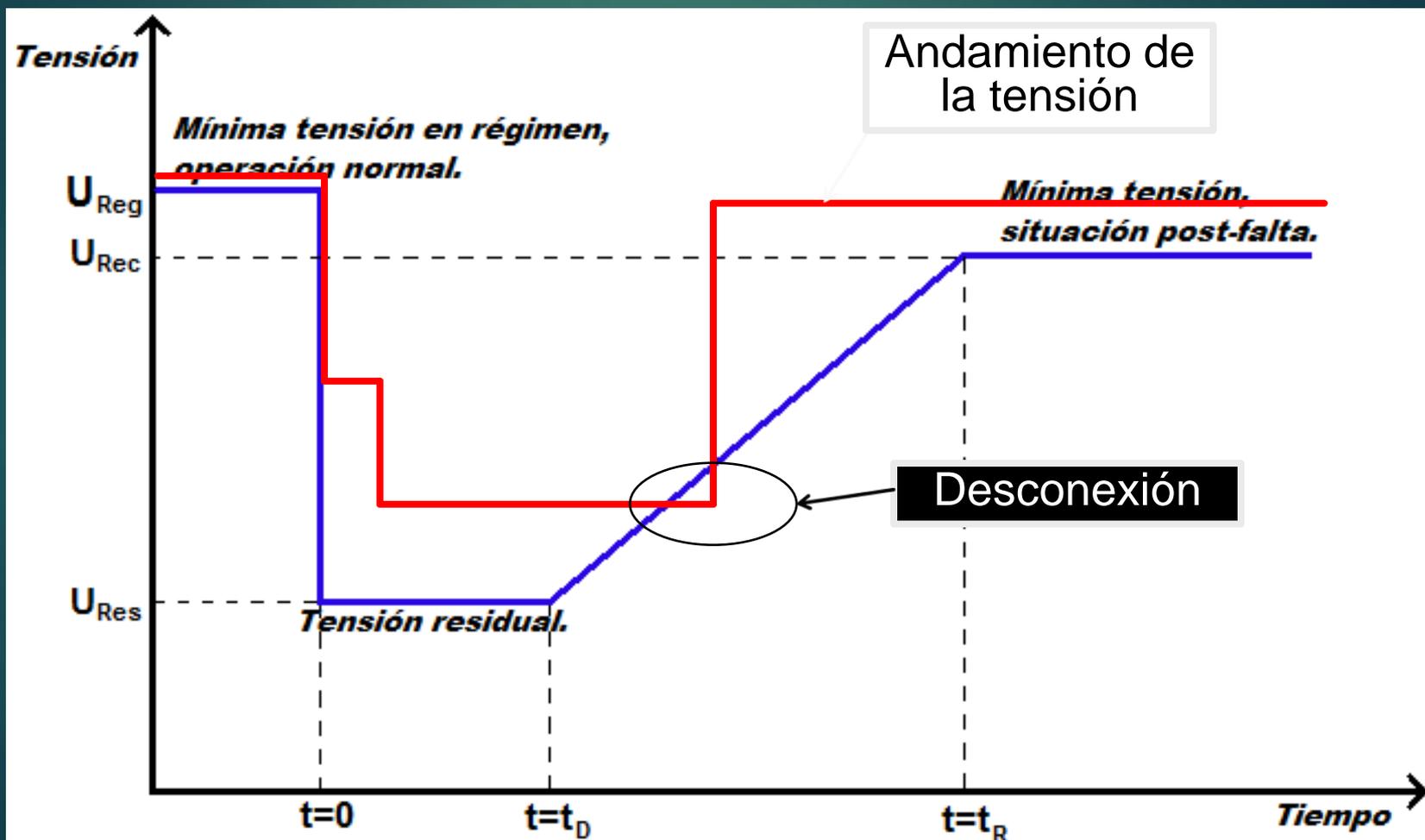
# Interpretaciones curva LVRT

- Dos interpretaciones
  - Evolvente
  - Tabla de tiempos



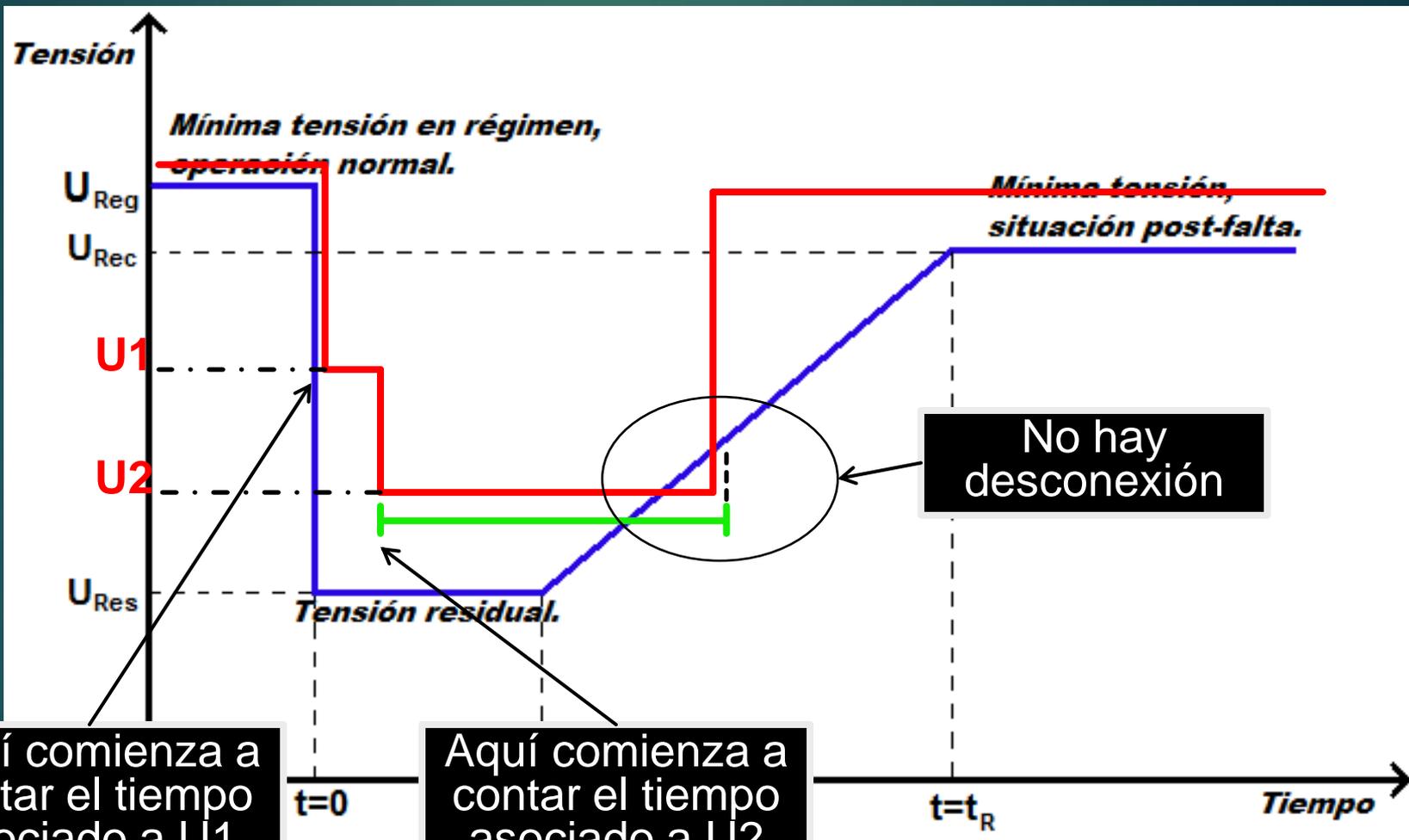
# Interpretaciones curva LVRT

## “Envolvente”



# Interpretaciones curva LVRT

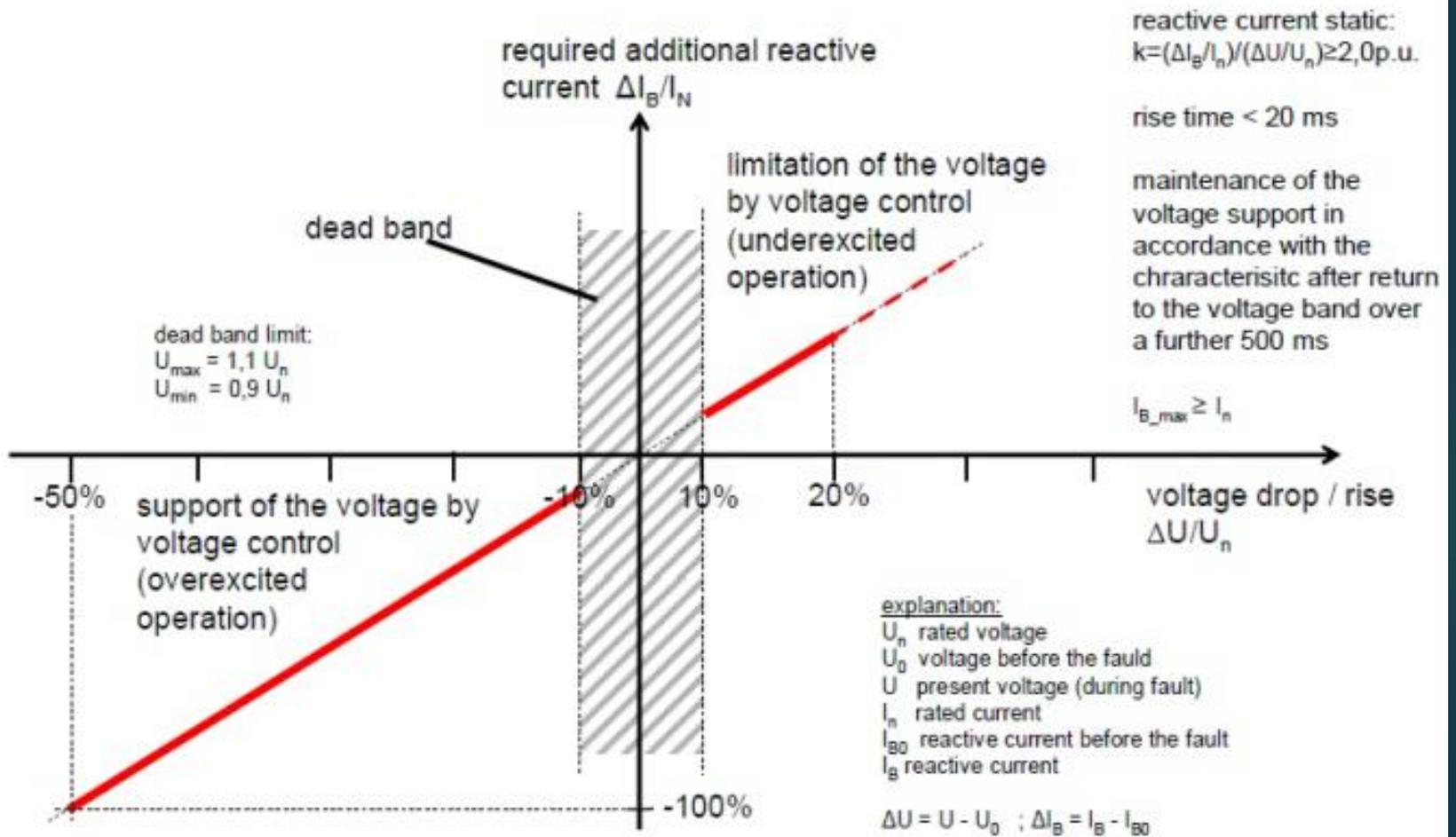
“Tabla de tiempos”



Aquí comienza a contar el tiempo asociado a  $U_1$

Aquí comienza a contar el tiempo asociado a  $U_2$

# Inyección de reactiva durante el hueco



# Efecto del hueco de tensión sobre el DFIG

- Ante la ocurrencia de un hueco de tensión aparecen sobretensiones importantes en el rotor del generador, debidas principalmente a la aparición de corrientes de secuencia inversa y la aparición de un “flujo natural” en la máquina.

La aparición de altas tensiones en el rotor de la máquina puede llevar a una saturación del convertidos, aumentando la posibilidad de daño del mismo.



El hueco genera dificultades en el control, ya que el estator es controlado a través del rotor.



El aumento de la tensión y la corriente rotórica puede provocar daños en el convertidor.

# Soluciones para la protección del DFIG durante HdT

## ❖ *Corriente desmagnetizante*

Esta técnica de control consiste en inyectar una corriente adecuada en el rotor, de forma tal que reduzca la FEM inducida en el mismo. (desmagnetice la máquina)

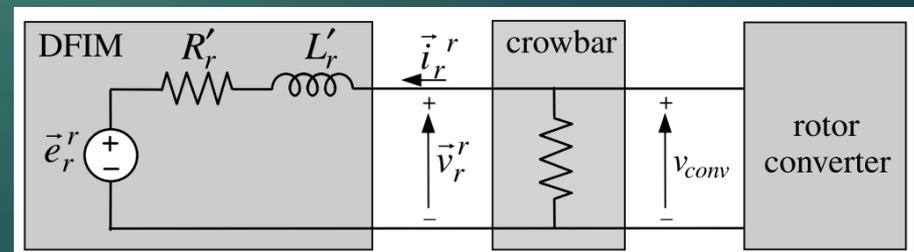
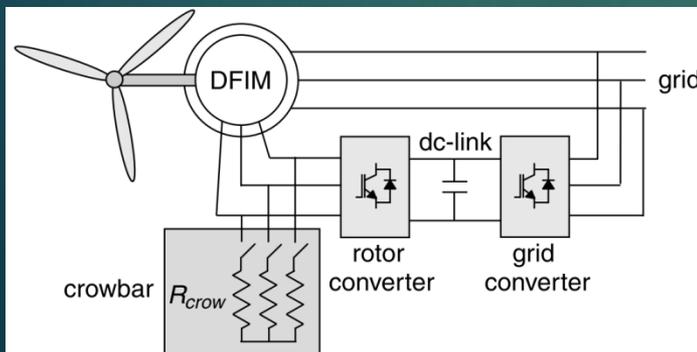
- La corriente inyectada debe solo disminuir el flujo asociados a la secuencia inversa y el flujo natural de la máquina.
- Mediante un control en el marco de referencia dq es posible controlar la corriente del rotor de forma de: desmagnetizar la máquina y controlar la potencia activa intercambiada por el estator.

# Soluciones para la protección del DFIG durante HdT

## ❖ CROWBAR

La función del crowbar es controlar la tensión aplicada sobre el convertidor del rotor durante el comienzo del hueco.

Para ello cortocircuita de forma controlada el rotor del DFIG, regulando de esta manera la tensión aplicada sobre el convertidor del rotor y acelerando el transitorio asociado al flujo natural.



# Soluciones para la protección del DFIG durante HdT

## ❖ *CROWBAR*

El crowbar va a actuar durante los primeros milisegundos, controlando la sobretensión inicial.

Durante este lapso de tiempo no será posible controlar la inyección de potencia reactiva del aerogenerador.

- Por tal motivo las exigencias de inyección de potencia reactiva durante los huecos de tensión comienzan del orden de 80ms - 150ms luego del comienzo del hueco.

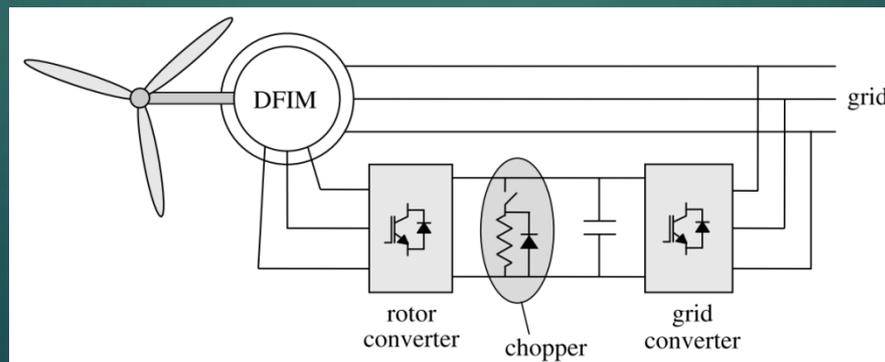
# Soluciones para la protección del DFIG durante HdT

## ❖ BRAKING CHOPPER

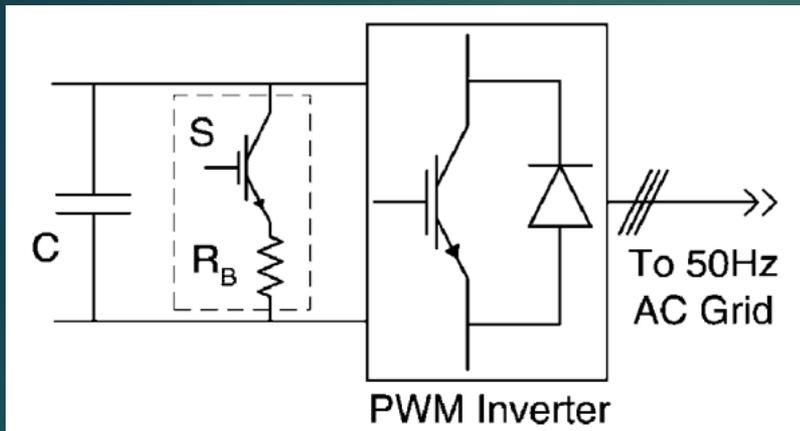
La función del chopper es controlar la tensión en el bus de continua.

No limita la corriente por el convertidor.

De utilizarlo solo es necesario sobredimensionar el convertidor, para que pueda manejar la corriente.



# Control durante HdT Full Converter



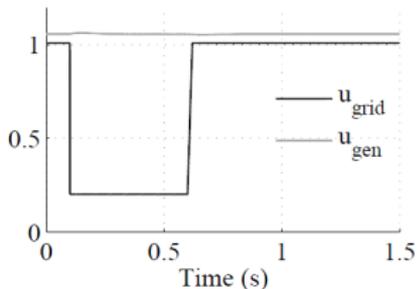
- La máquina queda desacoplada de la red, con lo cual no es afectada por la componentes de secuencia inversa.

- Al producirse un hueco de tensión el aerogenerador ve reducida su capacidad de inyectar potencia activa en forma proporcional a la profundidad del hueco.

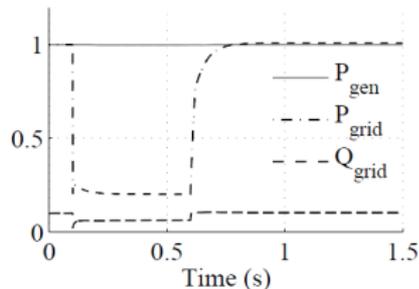
- La potencia mecánica capturada por el rotor se mantendrá constante.

- La potencia se acumulará o bien en forma de energía cinética en el rotor, o bien en el capacitor del bus de continua del convertidor.

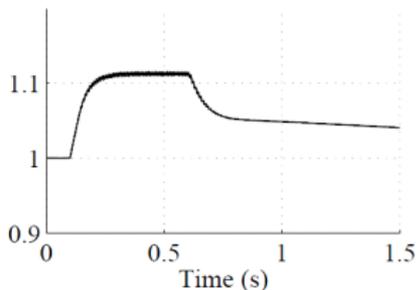
Grid and generator voltage [pu]



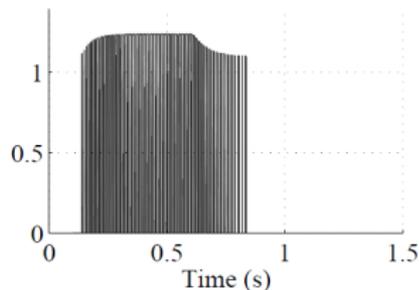
Generator and grid power [pu]



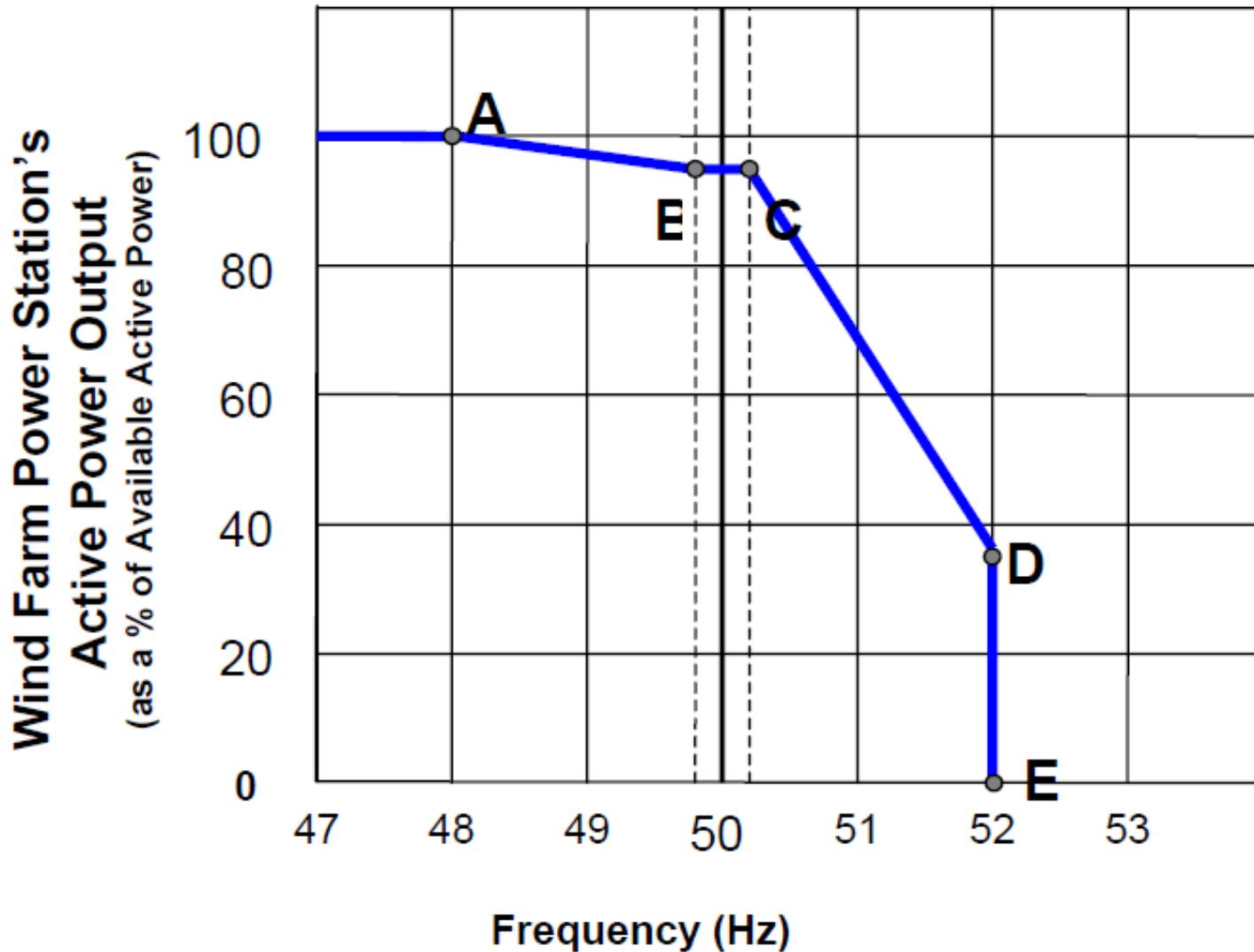
Dc-link voltage [pu]



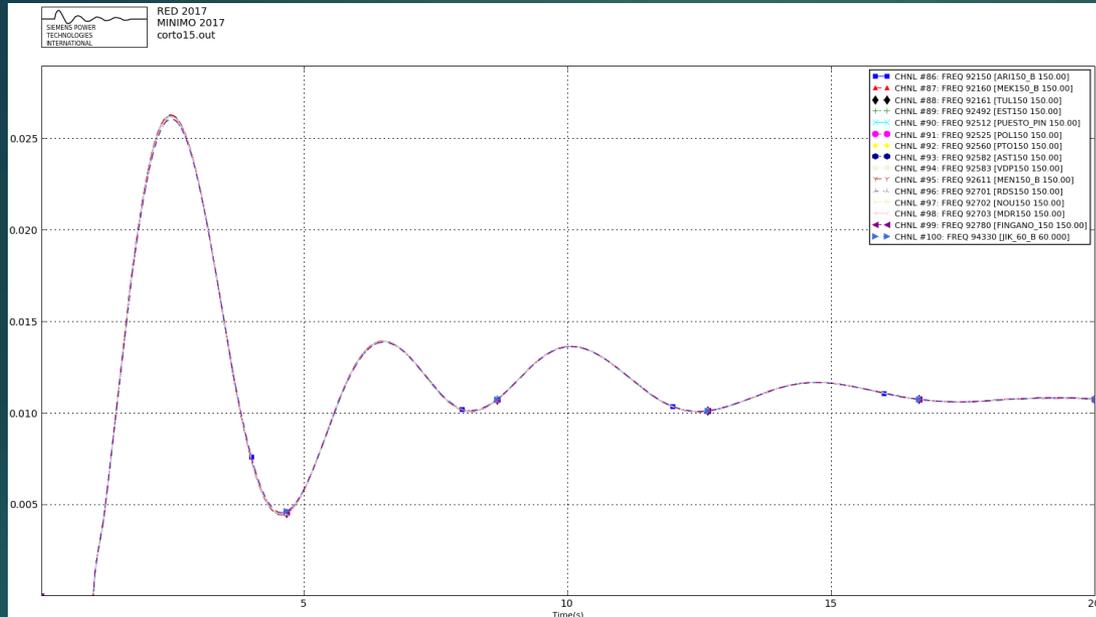
Braking power [pu]



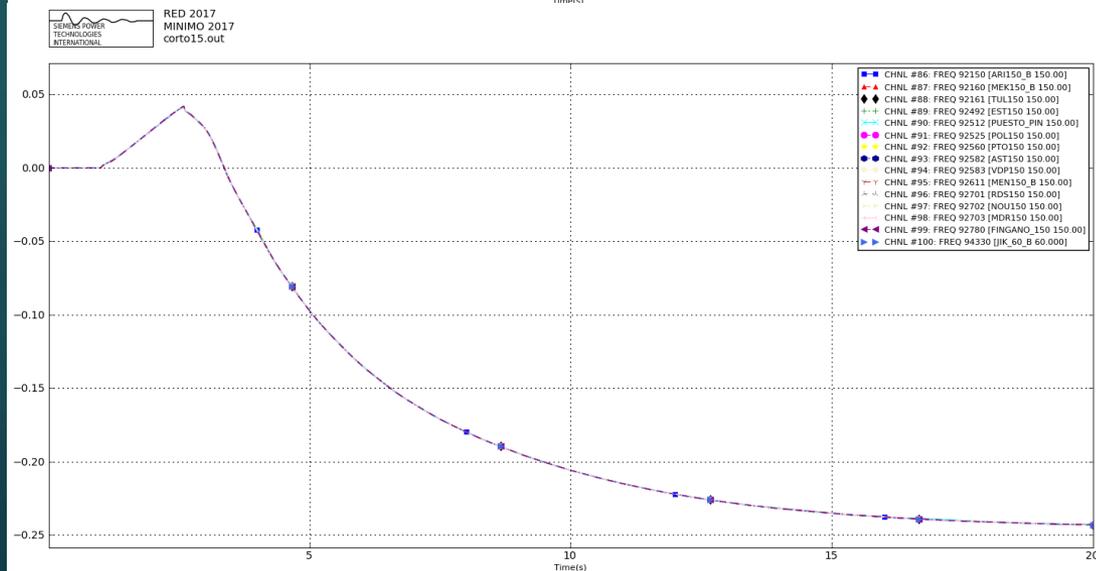
# Control $P(f)$



# Control P(f)



Desviación de frecuencia (p.u.) con APC



Desviación de frecuencia (p.u.) sin APC



# Inercia artificial

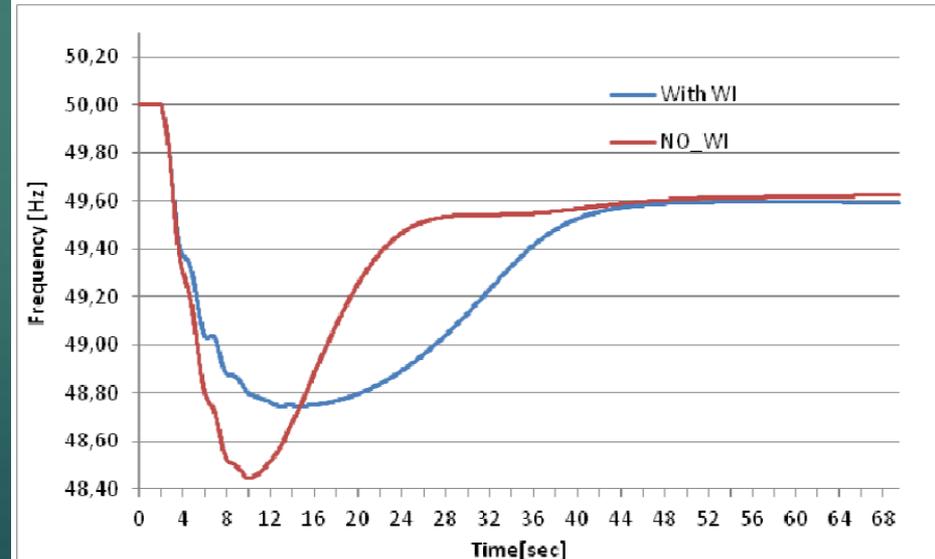
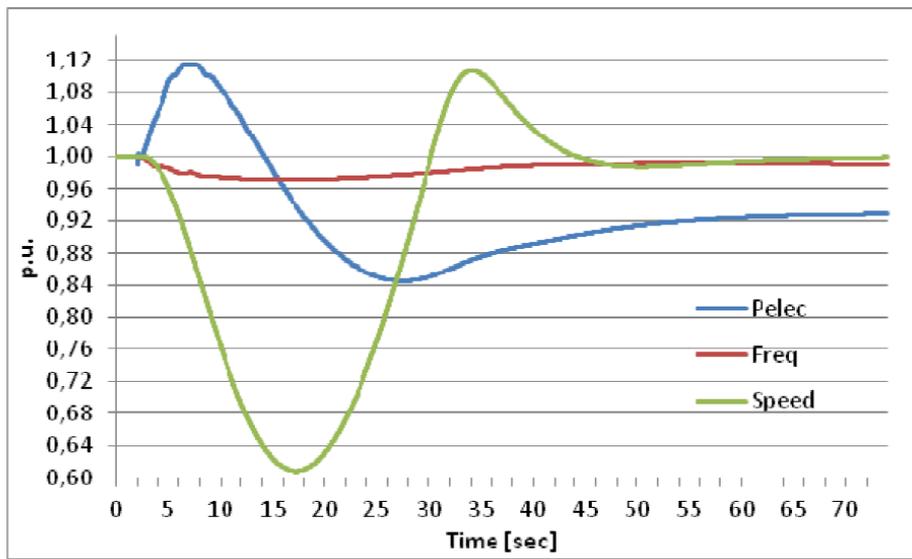
## □ Cómo emular inercia en aerogeneradores?

- ✓ Extrayendo parte de su energía cinética almacenada en el rotor y el generador, sin aumentar la potencia extraída del viento.
- ✓ Extrayendo energía de los condensadores del bus de continua .
- ✓ Por lo tanto, a diferencia de un generador convencional, ***emular una respuesta inercial implica un período de decrecimiento de la potencia inyectada luego de unos segundos.***

# Inercia artificial

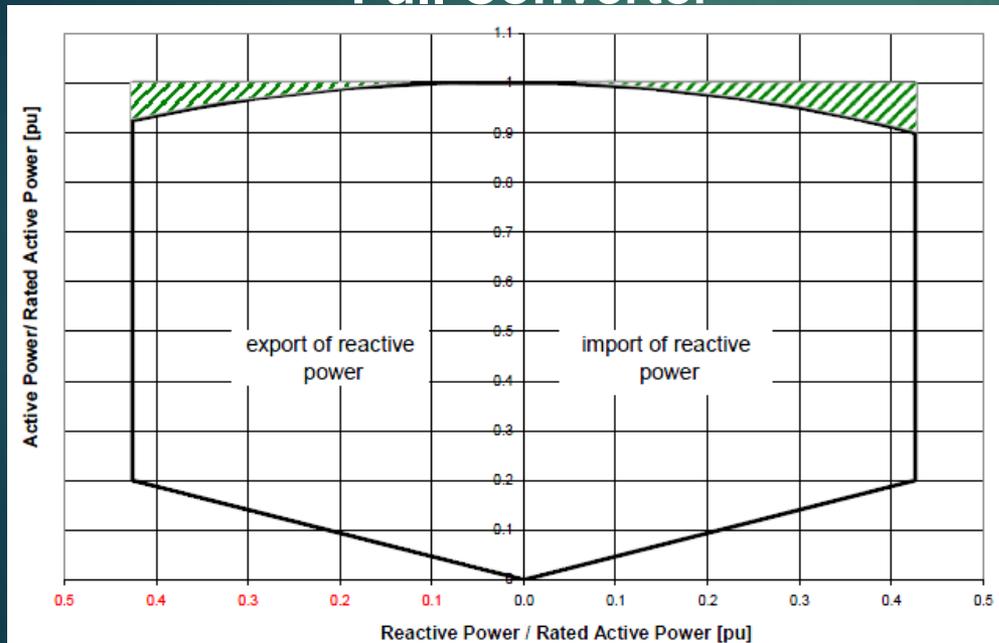
## Por que?

- ✓ Limitar la velocidad con la cual varía la frecuencia del sistema ante un evento.
- ✓ Limitar la excursión máxima de frecuencia.

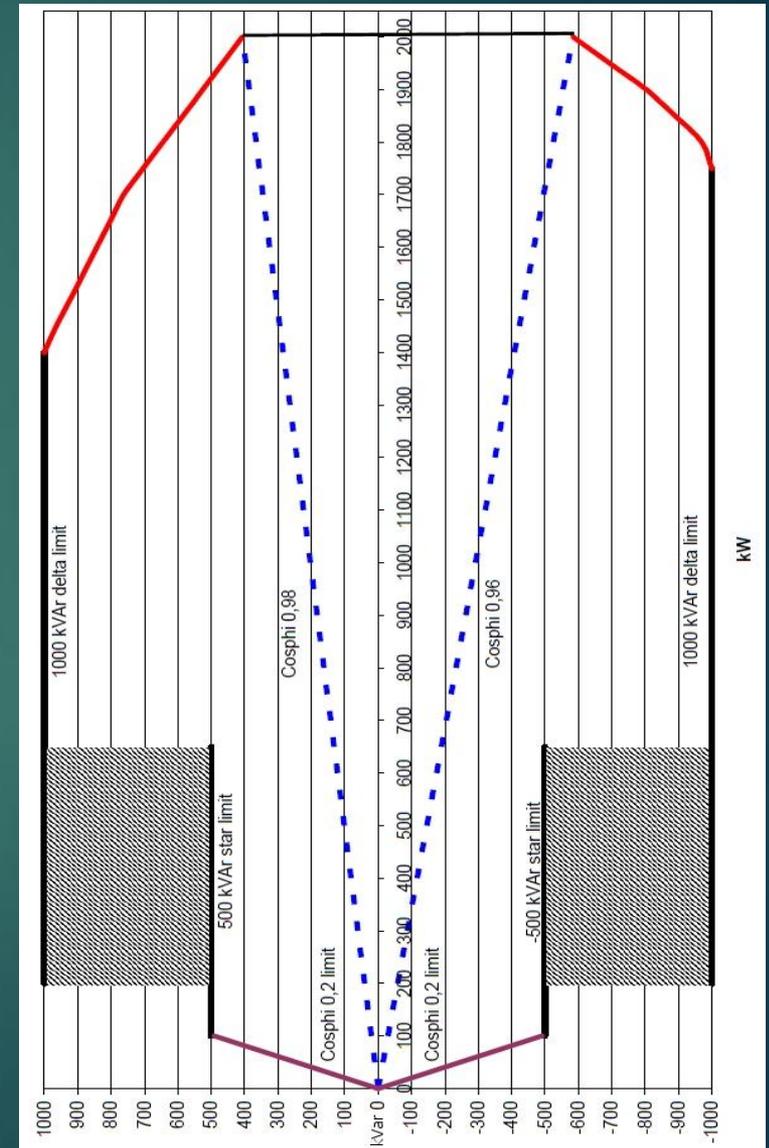


# ► Curvas P-Q

## Full Converter



## DFIG



# Regulación de reactiva

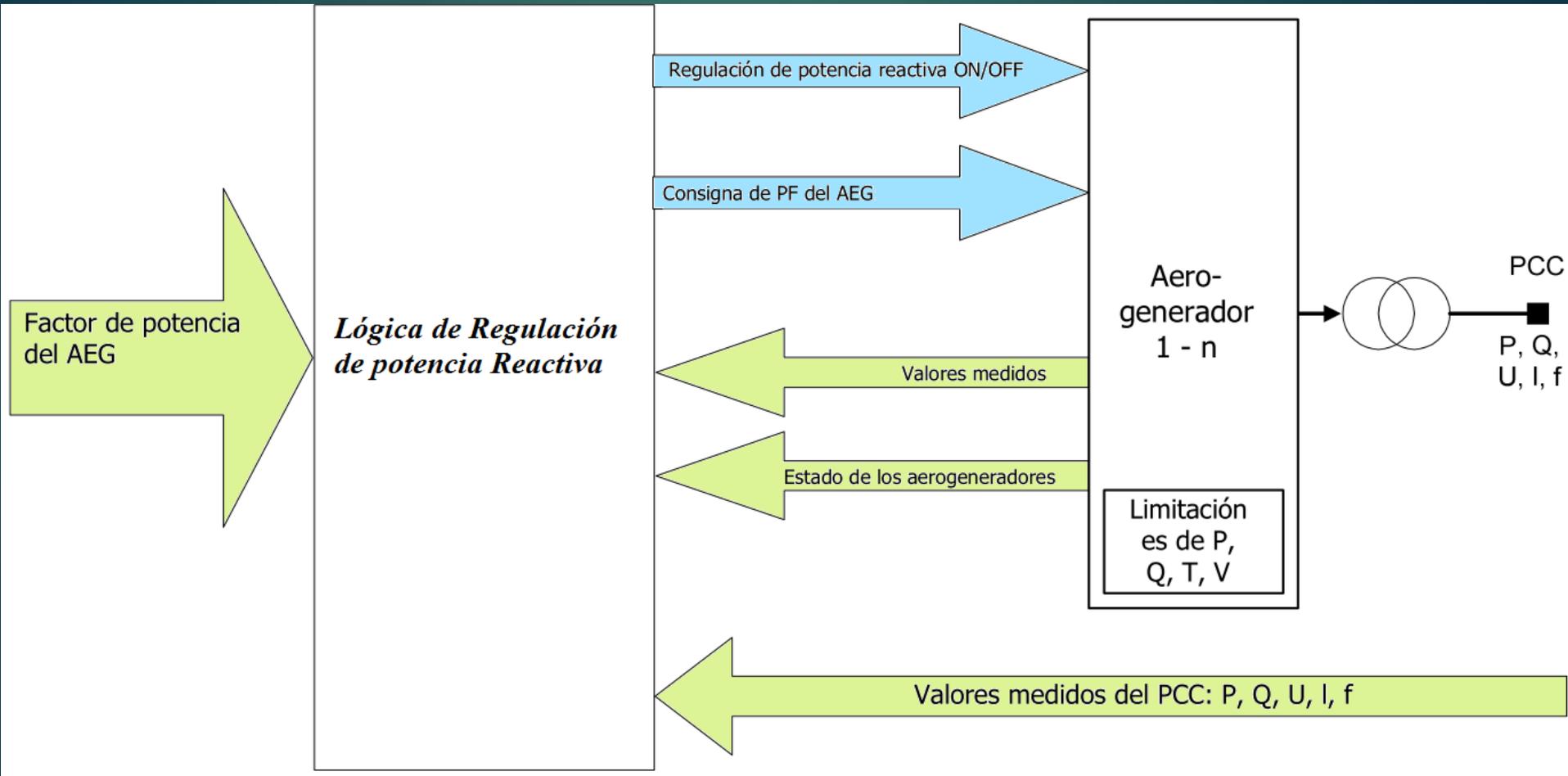
## ▶ Posibilidades:

- ▶ Control de la potencia reactiva en el nodo de conexión.
- ▶ Control de potencia reactiva en cada máquina.

## ▶ Tipos de control:

- ▶  $\cos(\phi) = \text{constante}$
- ▶ Q fija
- ▶ Consigna de tensión
- ▶ Dentro de estos controles se puede priorizar la pot. activa o la reactiva.

# Regulación de reactiva



# Regulación de reactiva

## ► Control en WEC o PoC

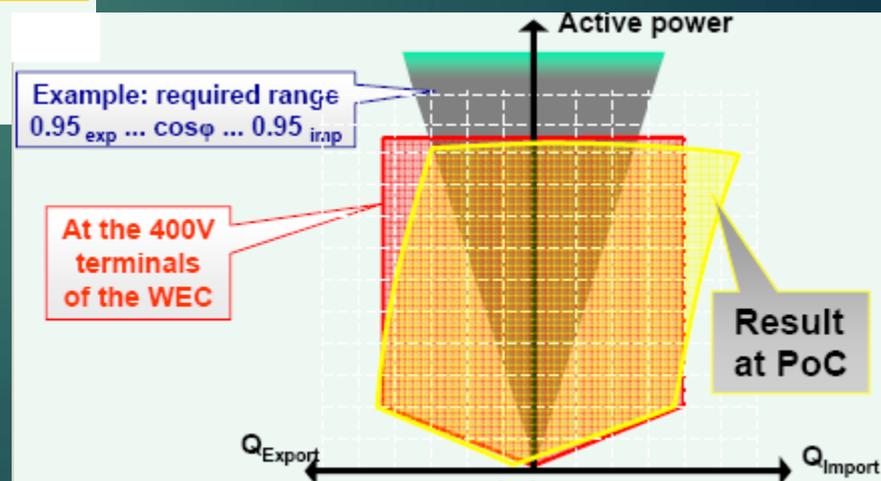
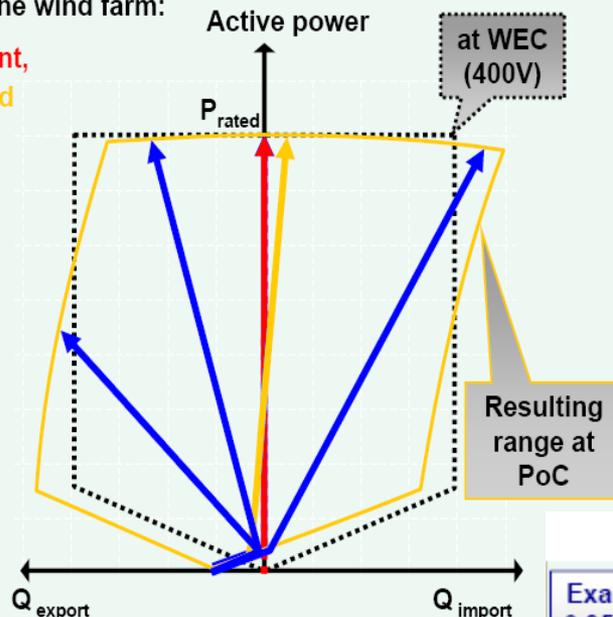
Looking to the point of connection of the wind farm:

Basic:  $\cos\phi$  at WEC terminals constant,  
at point of connection distorted

according to power flow

Simple:  $\cos\phi = \text{constant}$   
with closed-loop control

Smart:  $\cos\phi$  dynamic according to  
demand of system operator



# ESTABILIDAD & GENERACIÓN EÓLICA

- ✓ El **incremento de la penetración** de la generación eólica en el sistema eléctrico **puede cambiar la dinámica** del mismo, debido a las características propias de estos generadores.
- ✓ Uno de los principales aspectos a analizar es la **capacidad de soportar huecos de tensión** de los parques, ya que los mismos pueden provocar la desconexión masiva de generación eólica.
- ✓ La instalación de parques eólicos a gran escala puede traer cambios importantes en la **gestión de potencia activa y reactiva** de un sistema eléctrico, con el consecuente riesgo de la aparición de problemas de **estabilidad en tensión**.
- ✓ Especial cuidado debe tenerse cuando se cuenta con líneas con **compensación serie**, en donde se pueden darse **oscilaciones subsíncronas** a causa de la generación eólica.
- ✓ La **pérdida de inercia** del sistema es uno de las principales consecuencias de la inclusión de este tipo de generación, con consecuencia claras sobre la estabilidad del sistema.

A landscape photograph featuring two large wind turbines on a misty, elevated ridge. The foreground is a lush green valley with several cows grazing. The background shows rolling hills under a cloudy sky.

***Gracias por su atención***