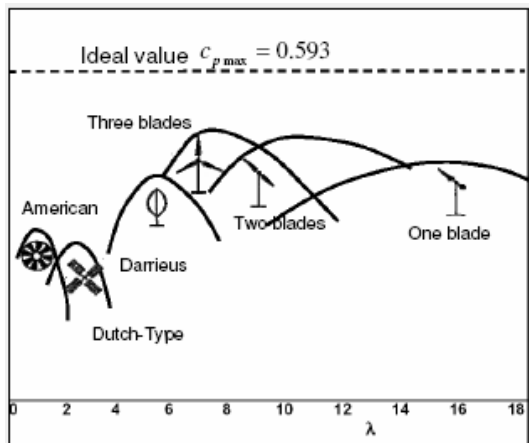
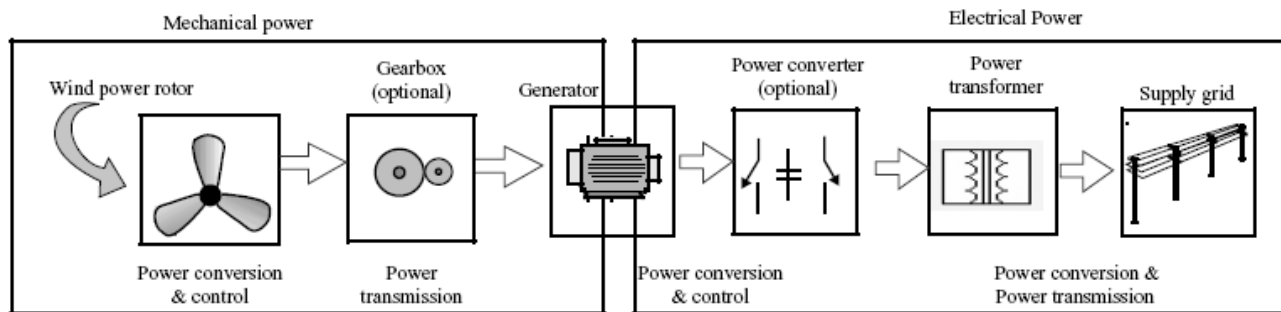


Incorporación Parques Eólicos a la Red: Estudios de Conexión y Códigos Eléctricos

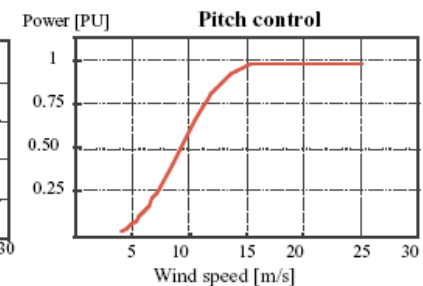
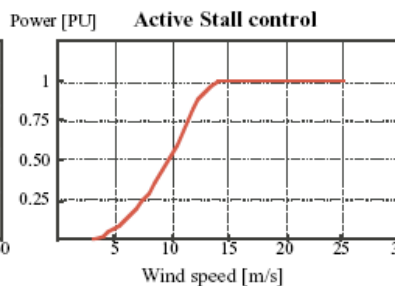
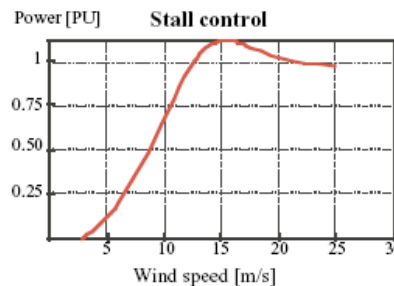
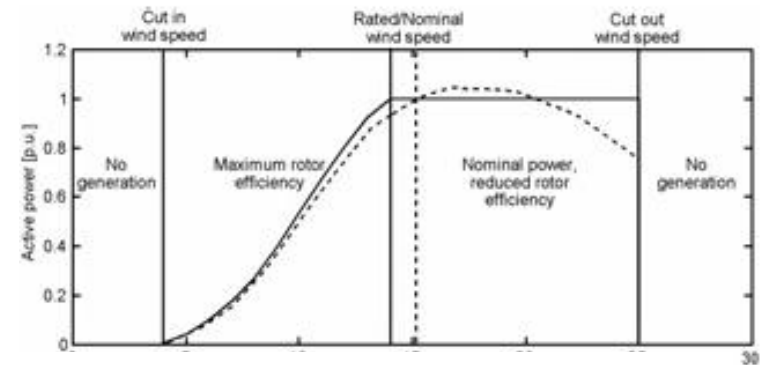
Víctor Velar Guerrero

- **Introducción**
- **Tipos de Aerogeneradores**
- **Estudios de Conexión**
- **Integración a la Red Eléctrica**

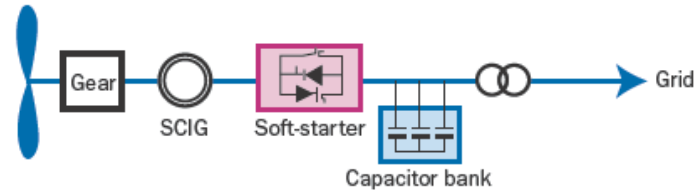
Principios Conversión Energía



$$P = \frac{1}{2} \rho_{air} C_p A_r v_w^3$$



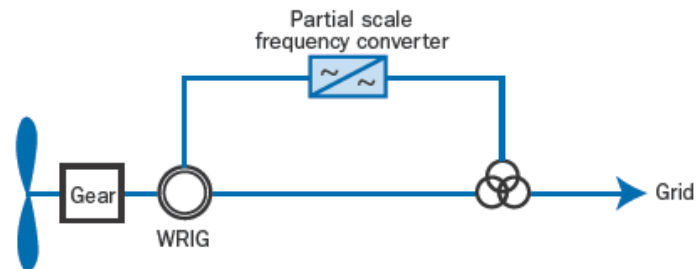
Tipos de aerogeneradores: Velocidad Fija



- Variación Velocidad: 0-2%
- Consumen reactivos → Instalar Bancos de CCEE
- No permite control de la potencia reactiva/tensión
- Desconexiones ante falla en la red eléctrica → Aceleración
- Control de la potencia activa nulo o muy lento
- Aportan al cortocircuito
- Pueden afectar la calidad de la potencia en el punto de conexión
 - Inrush → Partidores suaves
 - Flicker
- Sencillez Técnica → Bajo Costo

Ejemplo: Central Canela I (unidades Vestas V82 de 1.65 MW)

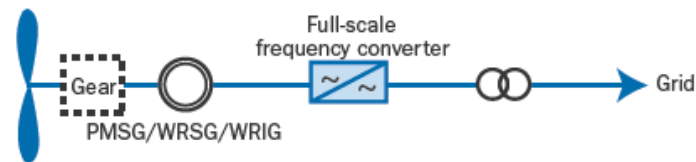
Tipos de aerogeneradores: Velocidad Variable Doblemente Alimentados (DFIG)



- **Variación Velocidad: hasta $\pm 40\%$**
- **Permite control de la potencia reactiva/tensión**
- **Pueden inyectar corriente reactiva ante fallas**
- **No se desconectan ante fallas en la red eléctrica**
- **Permite control de la potencia activa**
- **Mayor complejidad técnica \rightarrow Mayor costo**

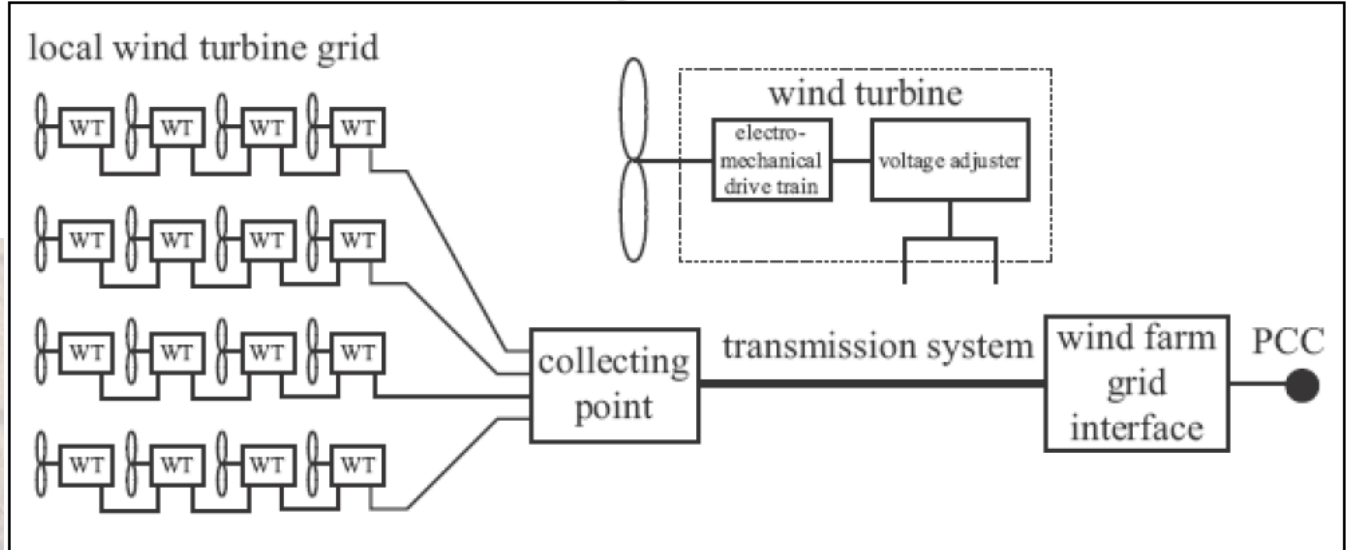
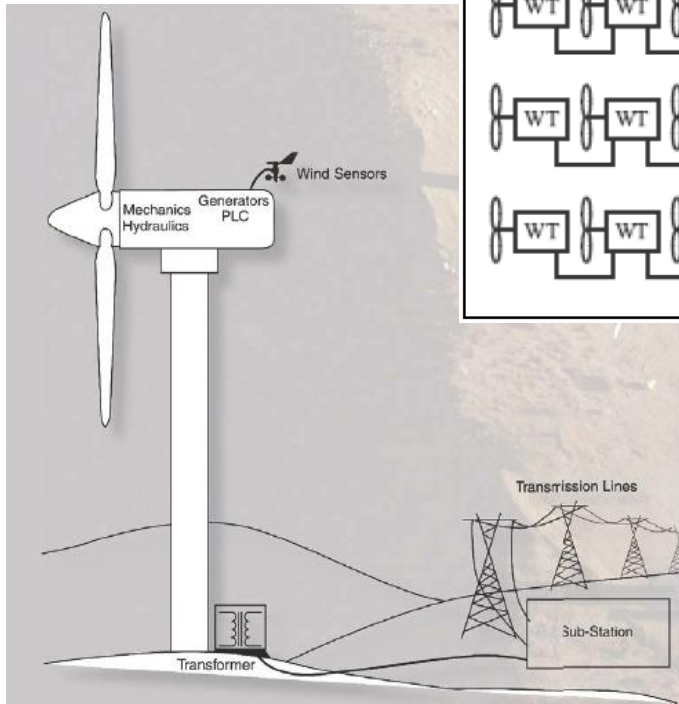
Ejemplo: **Central Canela II (unidades Acciona AW-1500 de 1.5 MW)**
Central Totoral (unidades Vestas V90 de 2 MW)
Central Monte Redondo (unidades Vestas V90 de 2 MW)

Tipos de aerogeneradores: Velocidad Variable con “Full Converter”



- **Amplio Rango Variación Velocidad**
- **Mejor control de la potencia reactiva**
- **Control dinámico de la tensión y factor de potencia → Rápido y continuo**
- **Pueden inyectar corriente reactiva ante fallas**
- **No se desconectan ante fallas en la red eléctrica**
- **Mejor control de la potencia activa**
- **Mayor complejidad técnica → Mayor costo**

Configuraciones Típicas de Parques Eólicos



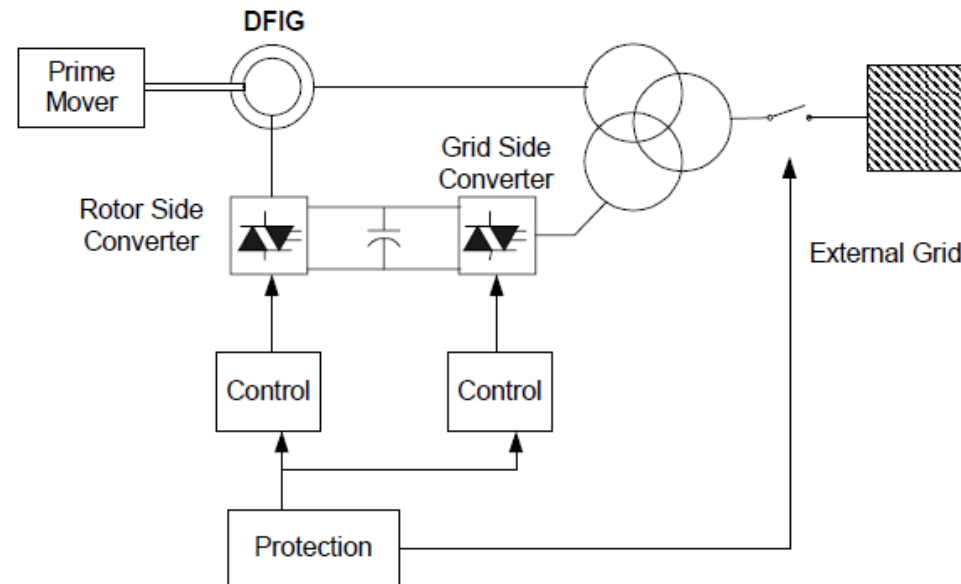
Tipos de Estudios Eléctricos e Información Requerida

- **Estudios Eléctricos para Integración a la Red**
 - Flujos de potencia.
 - Cortocircuitos.
 - Ajuste de protecciones.
 - Estabilidad transitoria.
 - Estabilidad permanente (pequeña señal).

- **Información Requerida:**
 - Tipo de Turbina → Tecnología
 - Modelos de control dinámico → Fabricante podría no entregar información → Hacer supuestos
 - Modelos encriptados para Digsilent o PSS/E
 - Transformadores y cables

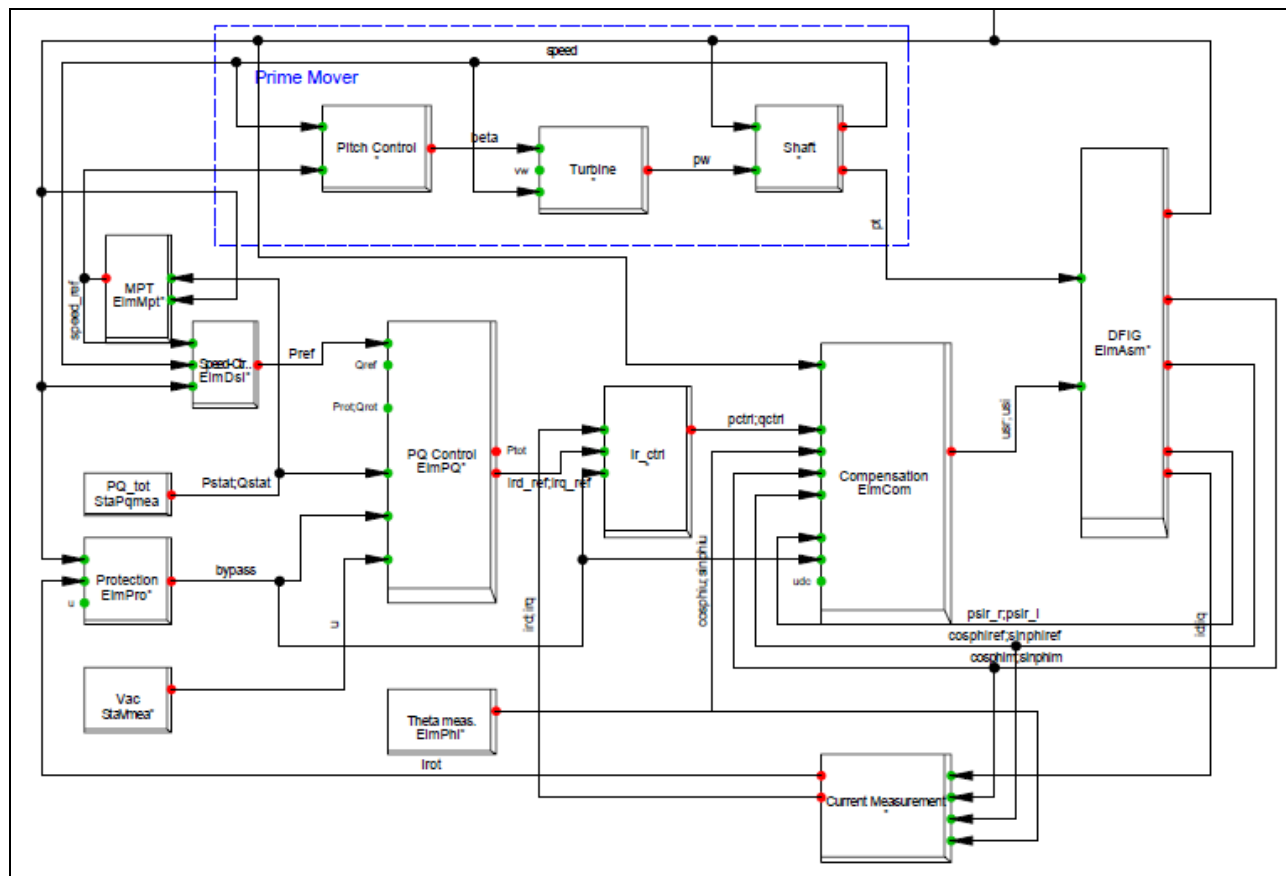
Aspectos Básicos de Modelación

- Modelo General Generador de Inducción Doblemente alimentado (DFIG)



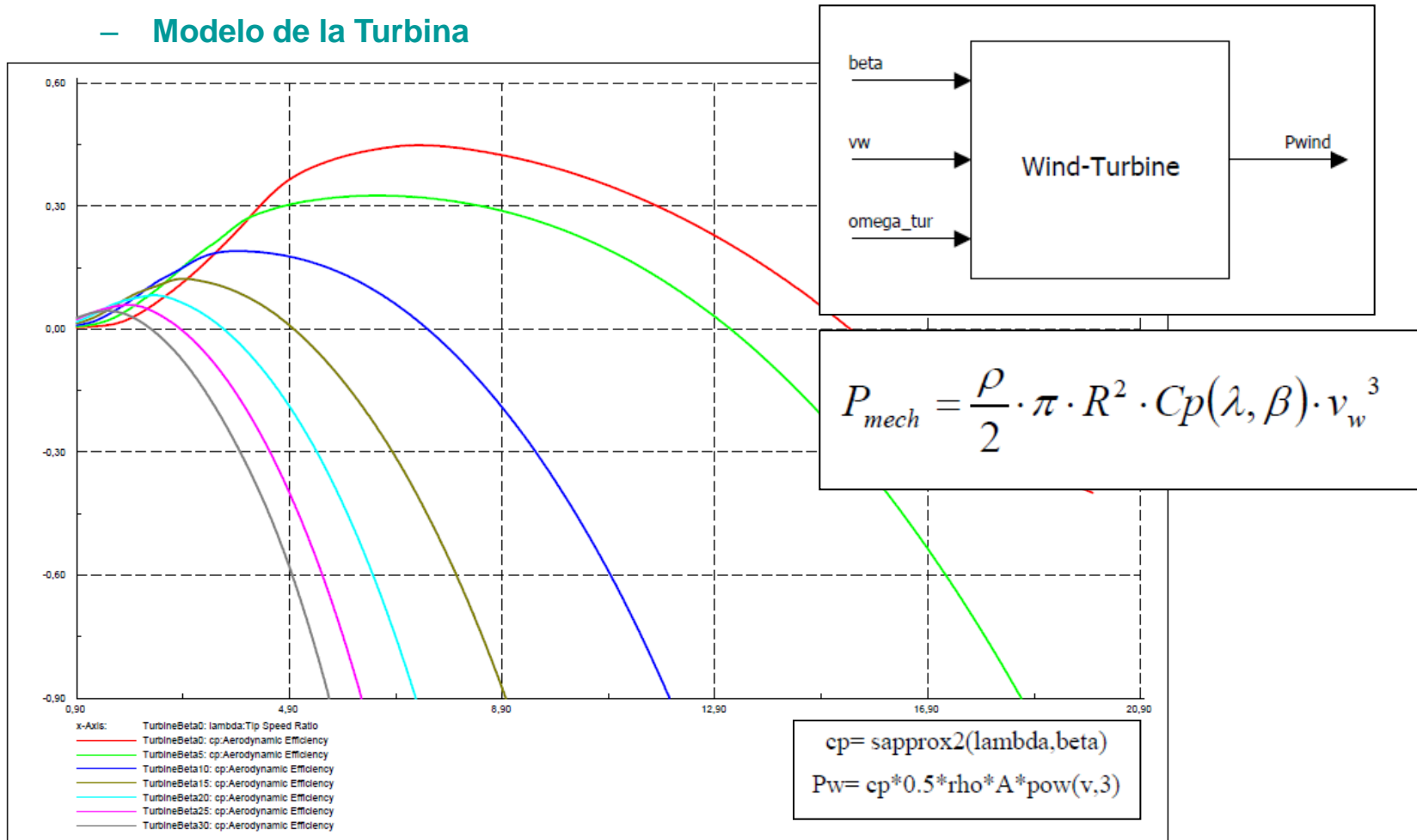
Aspectos Básicos de Modelación

- Modelo General Generador de Inducción Doblemente alimentado (DFIG)



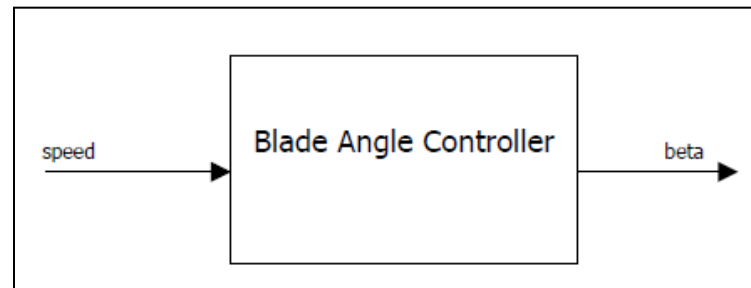
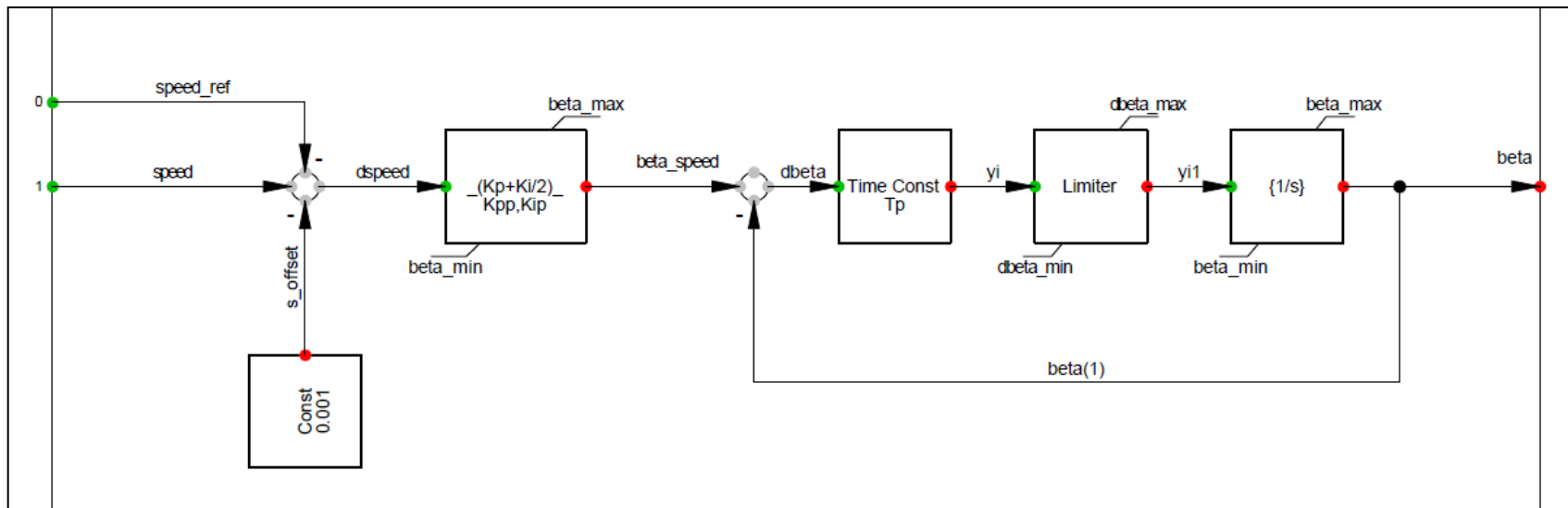
Aspectos Básicos de Modelación

– Modelo de la Turbina



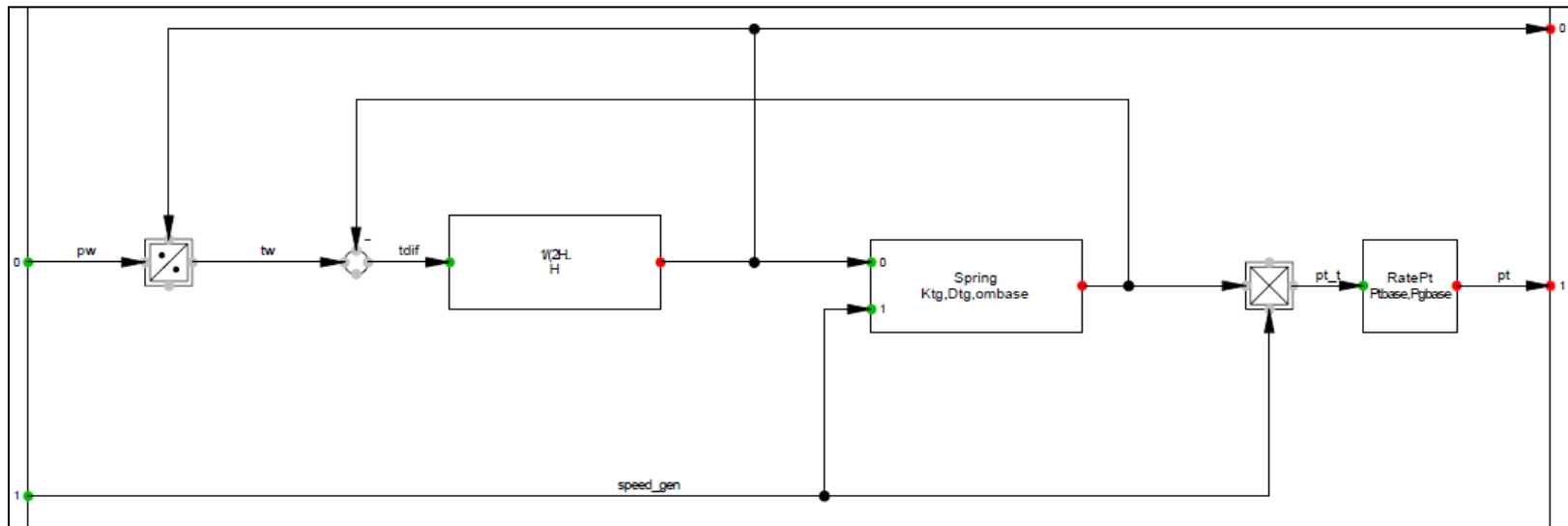
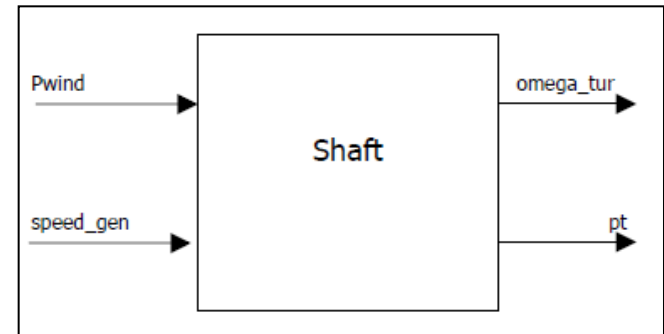
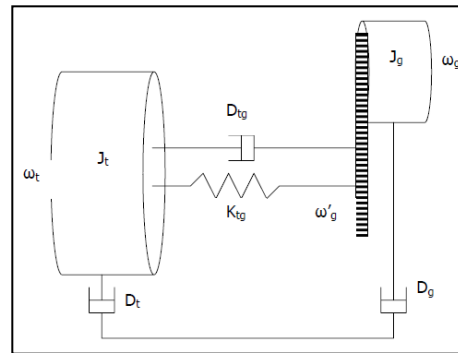
Aspectos Básicos de Modelación

– Modelo del Control del Ángulo de las Aspas



Aspectos Básicos de Modelación

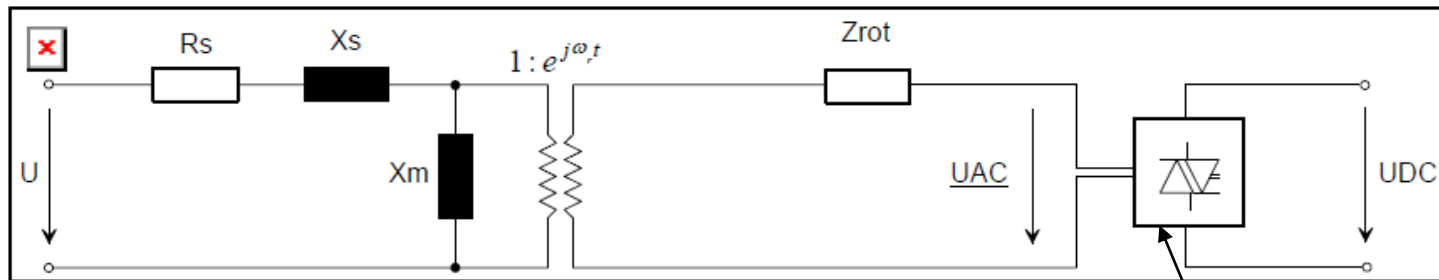
– Modelo del Eje



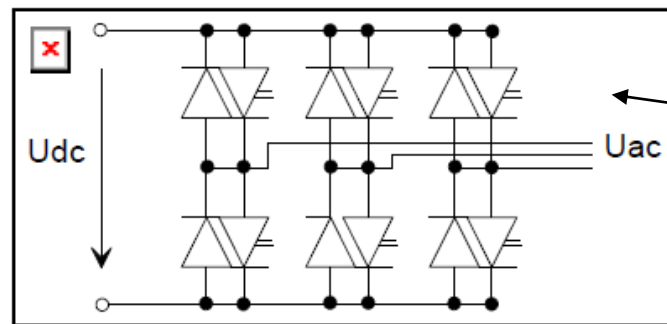
Aspectos Básicos de Modelación

– Modelo del Generador Eléctrico

Circuito Equivalente DFIG



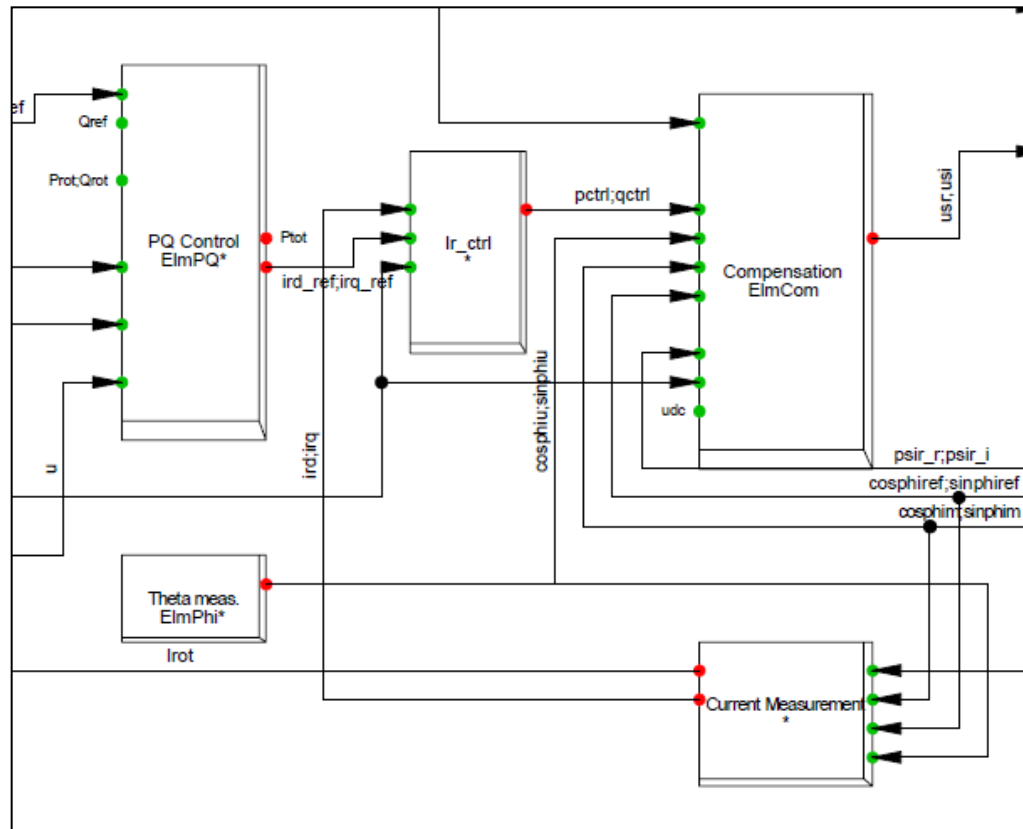
Convertidor PWM (lado del rotor)



Permite modificar magnitud y ángulo de fase del voltaje del rotor → Control rápido y flexible de la unidad

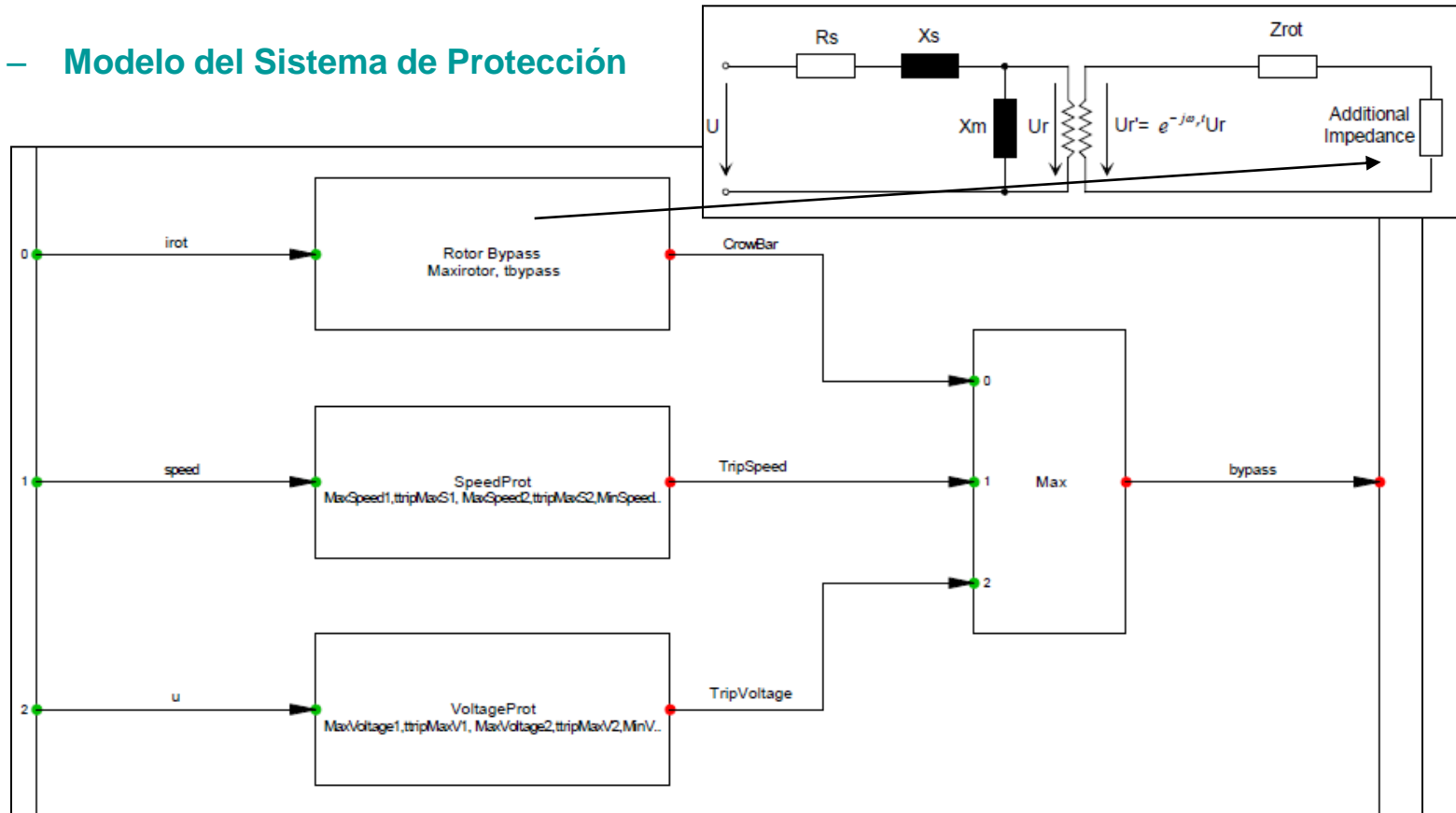
Aspectos Básicos de Modelación

– Modelo del Control del Convertidor



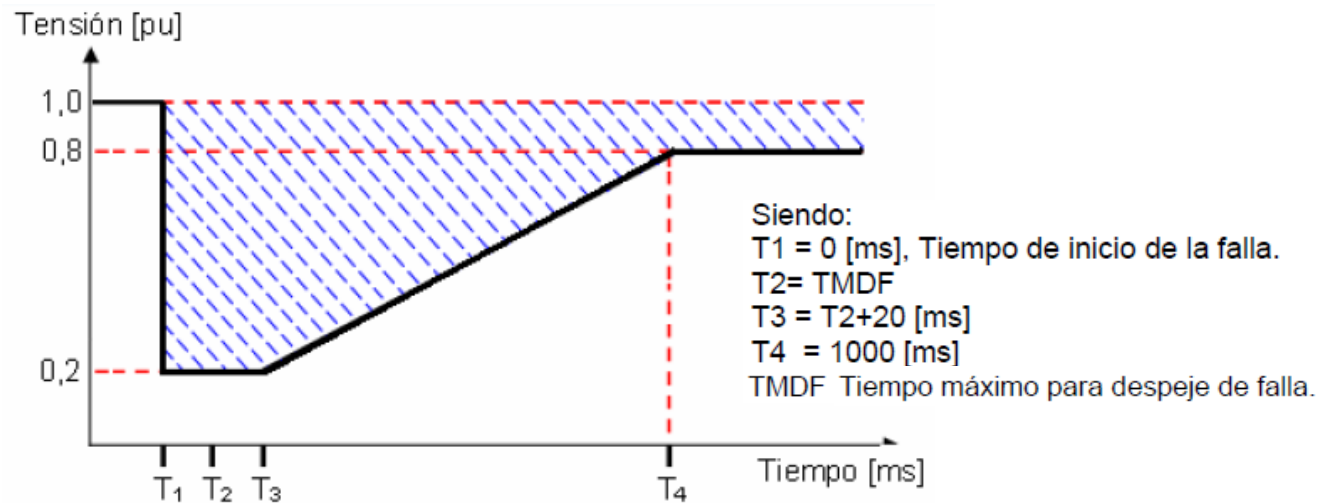
Aspectos Básicos de Modelación

– Modelo del Sistema de Protección

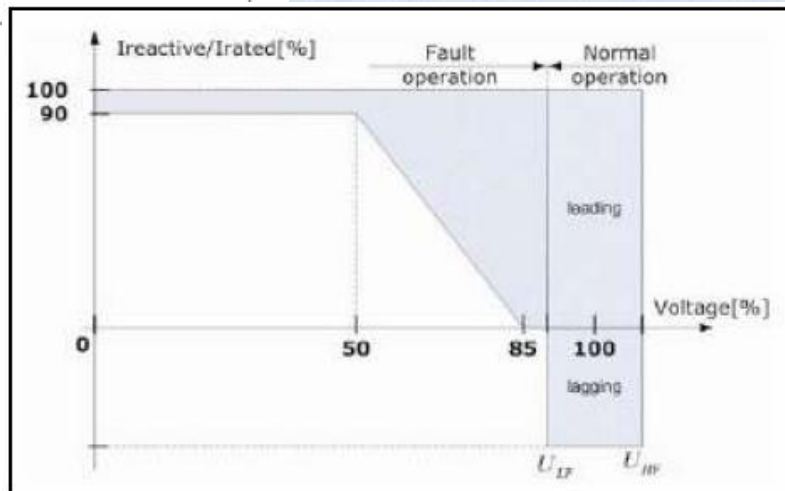
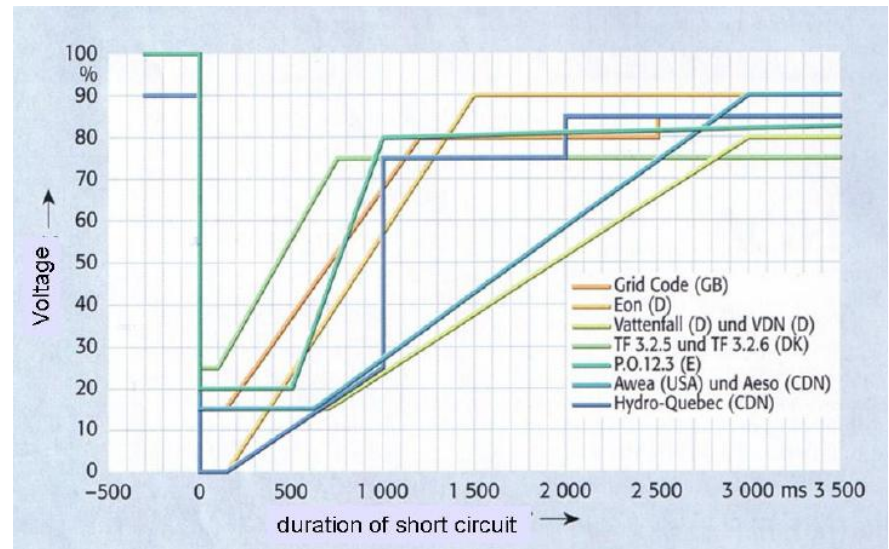
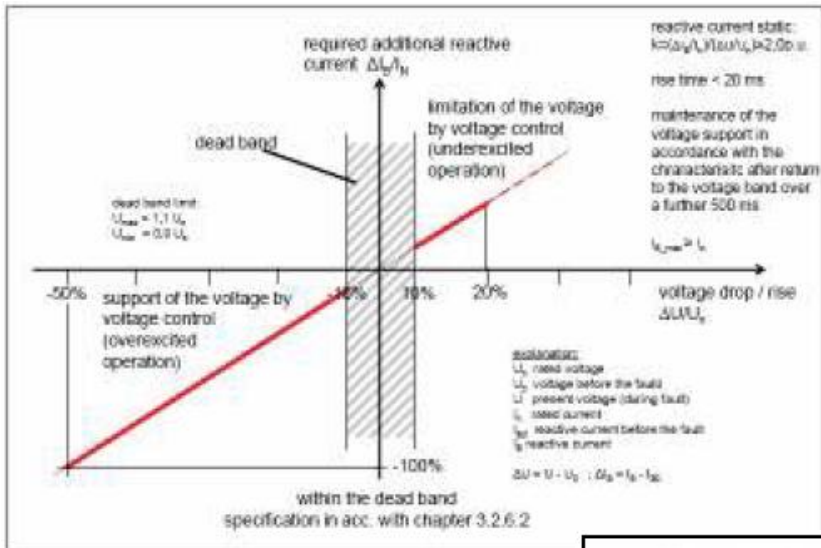


Capacidad Para Soportar Fallas: Chile

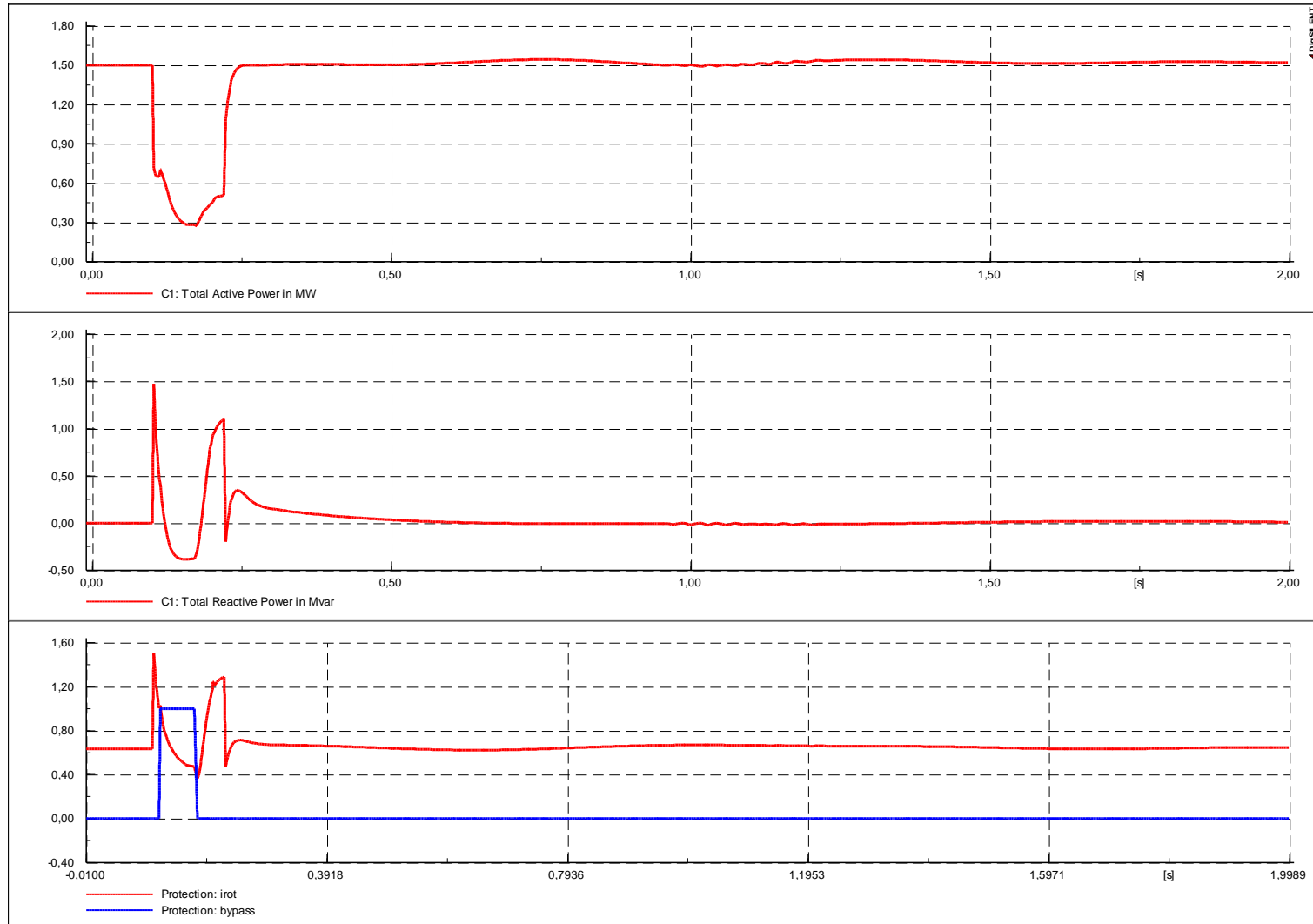
- Artículo 3-8: Las unidades de un parque eólico deberán ser diseñadas de modo de asegurar que el parque se mantenga en servicio cuando la tensión en el Punto de Conexión varíe, a consecuencia de una falla en el sistema de transmisión, dentro de la zona achurada de la figura ...



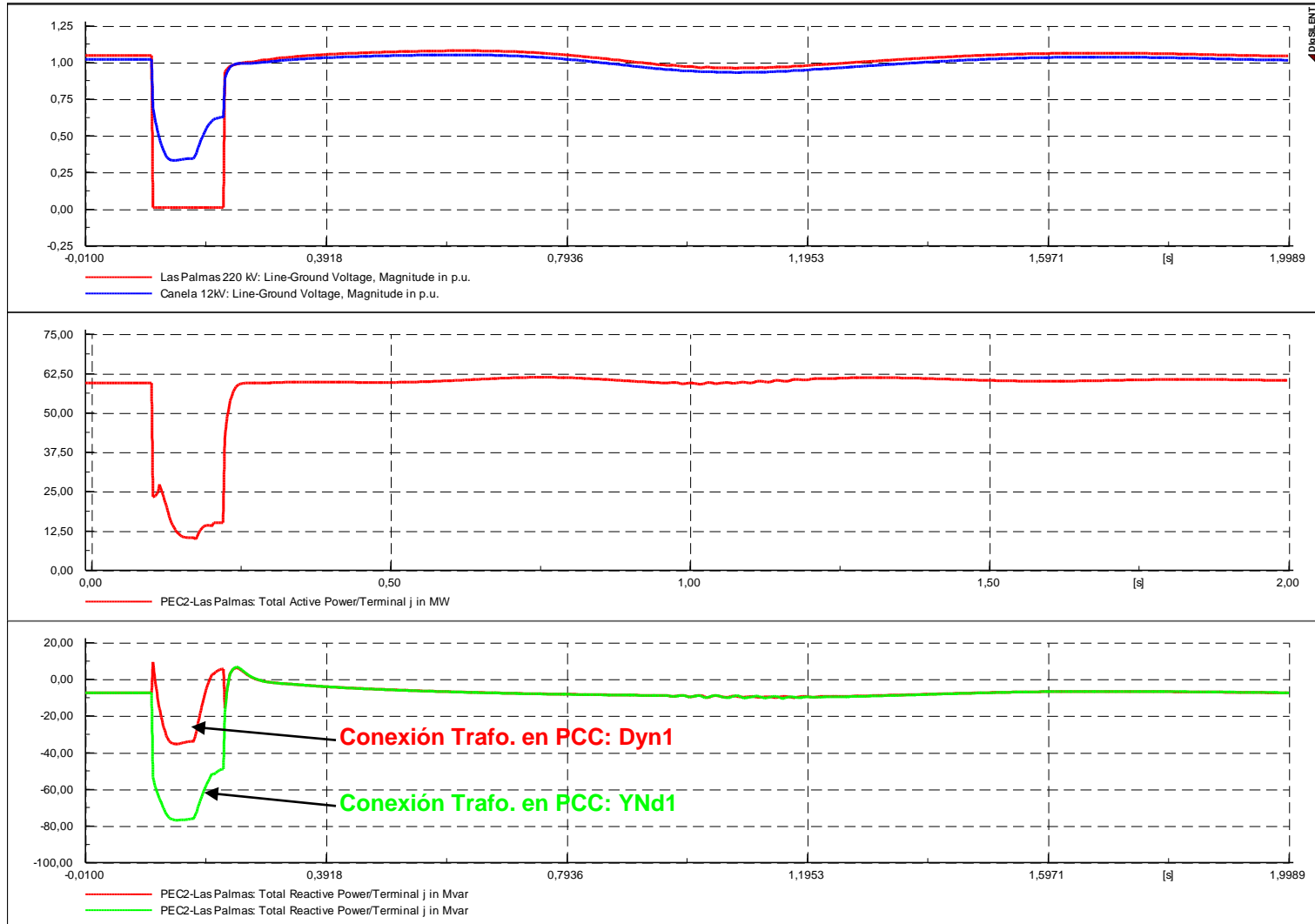
Capacidad Para Soportar Fallas: Europa



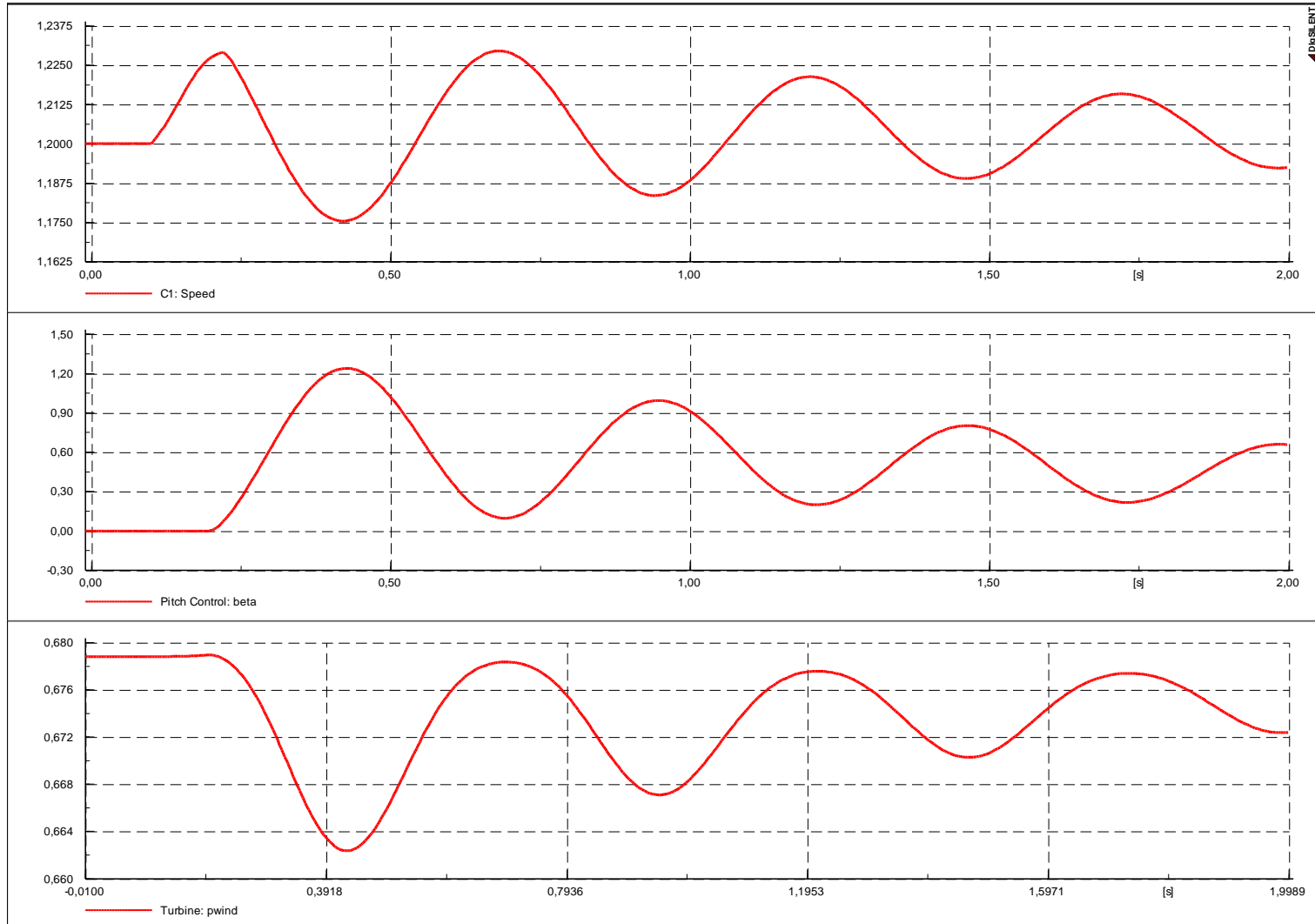
Capacidad Para Soportar Fallas: Ejemplo Canela II



Capacidad Para Soportar Fallas: Ejemplo Canela II



Capacidad Para Soportar Fallas: Ejemplo Canela II



Rango de Frecuencia: Chile (NT de SyCS)

- **Artículo 3-10:** Toda unidad deberá seguir operando para variaciones de frecuencia entre:

Límite Inferior (mayor que)	Límite Superior (menor o igual que)	Tiempo Mínimo de Operación		
		Hidroeléctricas	Termoeléctricas	Eólicas
49,0 Hz	50,0 Hz	Permanente	Permanente	Permanente
48,0 Hz	49,0 Hz	90 segundos	90 segundos	90 segundos
47,5 Hz	48,0 Hz	15 segundos	15 segundos	15 segundos
47,0 Hz	47,5 Hz	5 segundos	Desconexión	Desconexión
50,0 Hz	51,0 Hz	Permanente	Permanente	Permanente
51,0 Hz	51,5 Hz	90 segundos	90 segundos	Desconexión
51,5 Hz	52,0 Hz		5 segundos	Desconexión
52,0 Hz	52,5 Hz	15 segundos	Desconexión	Desconexión
52,5 Hz	53,0 Hz	5 segundos	Desconexión	

- **Artículo 3-12:** Toda unidad generadora deberá poder operar en forma permanente para un rango de frecuencia de entre 49,0 y 51,0 [Hz], para un rango de variación de la tensión que este entre 0,95 y 1,05 por unidad de la tensión nominal, medido en los terminales de la unidad generadora.

Rango de Frecuencia: Europa

Rango de frecuencia					
Frecuencia	Tiempo mínimo				
Hz	Dinamarca	Alemania	Irlanda	Escocia	Inglaterra
52 a 53 Hz	3 min	-	-	-	-
51.5 a 52 Hz	30 min	-	60 min	Operación continua	Operación continua
51 a 51.5 Hz	30 min	Operación continua	60 min	Operación continua	Operación continua
50.5 a 51 Hz	30 min	Operación continua	60 min	Operación continua	Operación continua
49.5 a 50.5 Hz	Operación continua	Operación continua	Operación continua	Operación continua	Operación continua
49.5 a 47.5 Hz	30 min	Operación continua	60 min	Operación continua	Operación continua
47.5 a 47 Hz	3 min	-	20 seg	20 seg	20 seg
>47 Hz	-	-	20 seg	20 seg	20 seg

- Rango 47.5 – 52 Hz

Generadores actuales cumplen sin problemas

Rango de Tensión: Chile (NT de SyCS) y Europa

- Artículo 3-12: Toda unidad generadora deberá poder operar en forma permanente para un rango de frecuencia de entre 49,0 y 51,0 [Hz], para un rango de variación de la tensión que este entre 0,95 y 1,05 por unidad de la tensión nominal, medido en los terminales de la unidad generadora.
- Artículos 5-25, 5-29 y 5-60: rangos para Estado Normal, Alerta y Emergencia.
- En Europa:

Rango de Voltaje									
Operación continua									
Dinamarca		Alemania		Irlanda		Escocia		Inglaterra	
400 kV	-10%/+5%	400 kV	-8%/+10%	400 kV	-13%/+5%	400 kV	-5%/+5%	400 kV	-10%/+5%
150 kV	-3%/+13%	220 kV	-13%/+12%	220 kV	-9%/+12%	275 kV	-10%/+10%	275 kV	-10%/+10%
132 kV	-5%/+10%	110 kV	-13%/+12%	110 kV	-10%/+12%	132 kV	-10%/+10%	132 kV	-10%/+10%
Tiempo limitado									
Dinamarca (1 hora)		Alemania		Irlanda		Escocia (15 min)		Inglaterra (15 min)	
400 kV	-20%/+10%	-	-	-	-	400 kV	-10%/+10%	400 kV	-10%/+10%
150 kV	-10%/+20%	-	-	-	-	275 kV	-15%/+15%	275 kV	-10%/+10%
132 kV	-10%/+18%	-	-	-	-	132 kV	-20%/+20%	132 kV	-10%/+10%

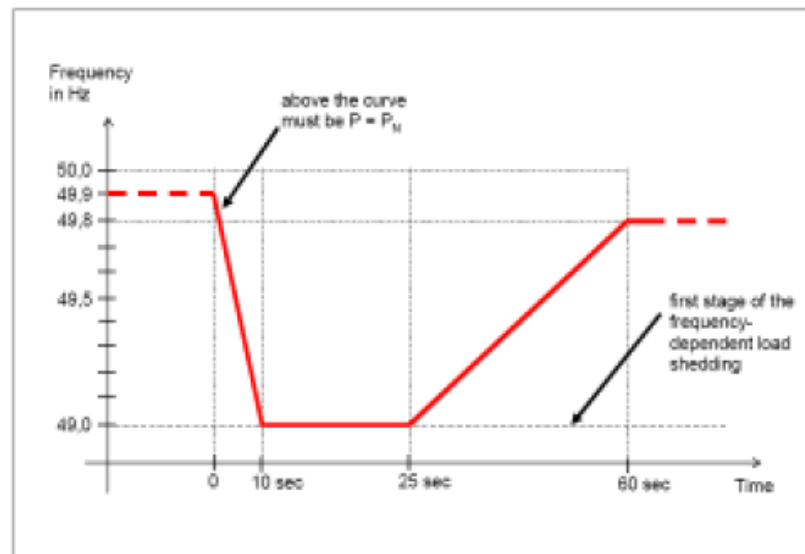
Generadores actuales cumplen sin problemas

Control de Potencia Activa - Respuesta de Frecuencia

- **Chile: Artículo 3-11: Toda unidad generadora deberá ser capaz de:**
 - Operar en forma estable a potencia nominal para frecuencias en el rango rango 49.5 – 51 Hz.
 - Operar en forma estable a valores de potencia \geq al 80% de la potencia nominal para frecuencias en el rango 47.5 – 49.5 Hz.
 - Informar potencias de operación en función de la frecuencia
- **Europa (Dinamarca)**
 - Poder reducir la potencia activa \rightarrow Reservas para eventos críticos
 - Mantener la potencia activa constante
 - Limitar razones de toma o disminución de carga
- **Europa (Alemania)**
 - Capaz de operar a potencia reducida
 - Variaciones de potencia de un 10% P_{nom}/min
 - No reducir la potencia activa frente a caídas de frecuencia

Control de Potencia Activa - Respuesta de Frecuencia

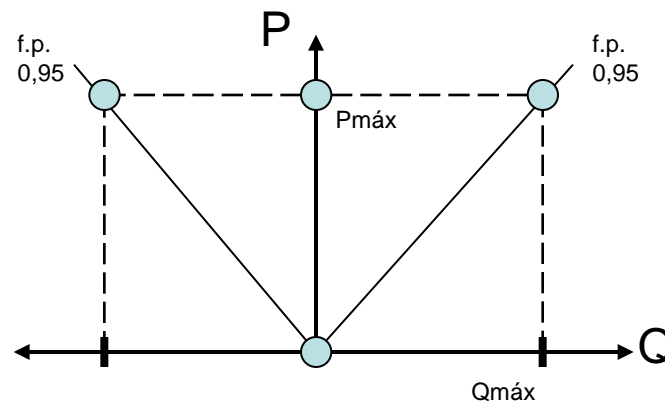
– Europa (Alemania)



- Exigencias para sistemas con alta penetración eólica
- Deseable pero....pudieran ser excesivas e ineficientes económicamente

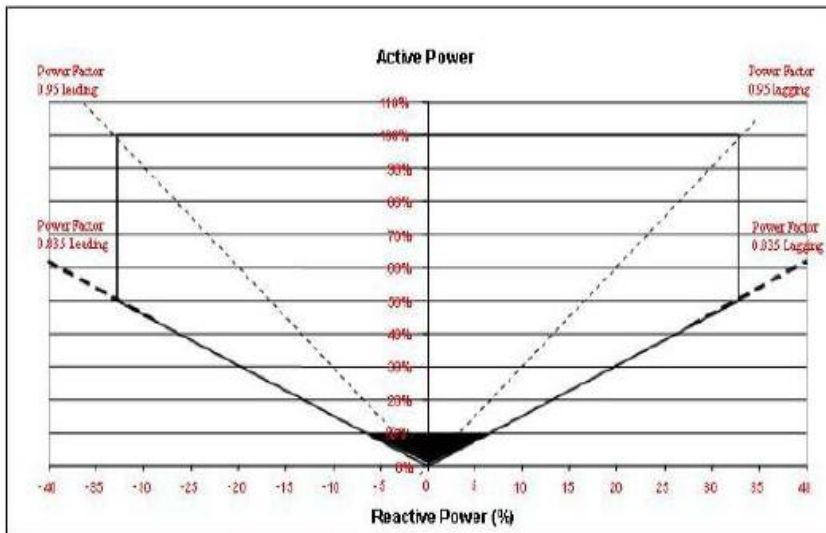
Control de Potencia Reactiva y de Tensión

- **Artículo 3-9 (Chile):** Para parques eólicos y tensiones en Estado Normal, se debe poder operar en forma permanente entregando o absorbiendo reactivos, en el punto de conexión ... en las zonas definidas a continuación:
 - **Zona de operación entregando reactivos:**
 - Potencias activa y reactiva nulas.
 - La potencia activa máxima y la potencia reactiva nula.
 - Las potencias activa y reactiva máximas correspondientes a factor de potencia 0,95.
 - **Zona de operación absorbiendo reactivos:**
 - Potencias activa y reactiva nulas.
 - La potencia activa máxima y la potencia reactiva nula.
 - Las potencias activa y reactiva máximas correspondientes a factor de potencia 0,95.



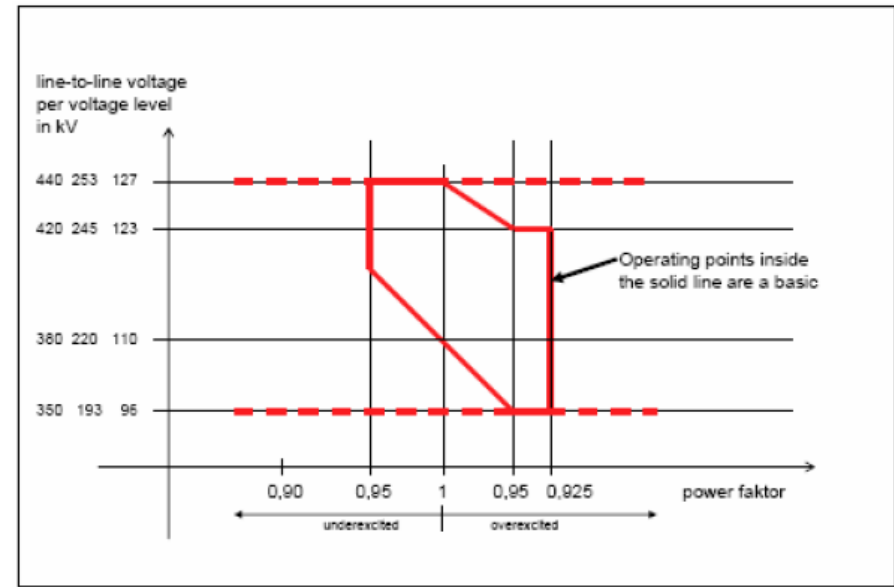
Control de Potencia Reactiva y de Tensión

- Europa (Irlanda)



- Europa (Alemania)

- Factor de potencia 0.95 para potencias menores a 100 MW
- Para potencias mayores a 100 MW:



Control de Potencia Reactiva y de Tensión

- **En Chile: Artículo 5-62 NT de SyCS: para el control de las tensiones del SI los parques eólicos deberán operarse hasta un factor de potencia 0,95 inductivo o capacitivo, en el punto de conexión**
- **En Europa el control de tensión se exige a nivel de parque y/o unidades individuales → Control automático**

FIN