Energia Eólica

Tipos de Aerogeradores
Modelização, Controlo e Protecções

J. A. Peças Lopes

Universidade do Porto
FEUP Faculdade de Engenharia

Introdução

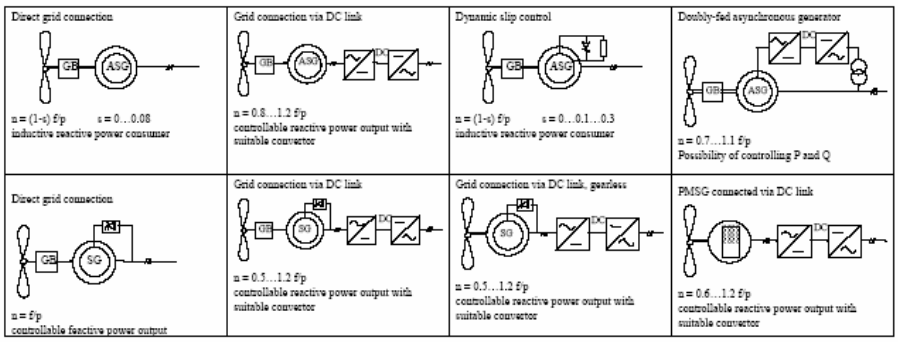
- **Existem fundamentalmente 3 tipos de aerogeradores com aplicação industrial:**
  - Máquinas assíncronas (com e sem controlo do ângulo de pitch);
  - Máquinas assíncronas duplamente alimentadas - (Doubly fed induction wind generators -DFIWG);
  - Máquinas síncronas de velocidade variável.

Conversores Electrónicos

(as máquinas assíncronas começaram por ser inicialmente utilizadas, tendo hoje uma quota de mercado muito reduzida)

Tipo de Geradores

- **CIGRE TF38.0110**



Componentes aerodinâmicas

- **Três variáveis aerodinâmicas definem o comportamento da turbina eólica:**
  - **λ - relação de velocidade de extremidade das pás (*tip speed ratio*)**
  - ***Cp* - O coeficiente de potência;**
  - **θ - O ângulo de pitch.**

- **Definem-se estratégias de controlo para os modos de operação em velocidade fixa ou em velocidade variável.**

Potência disponível

$$P_w = \frac{1}{2}\rho C_p A V_w^3$$

onde:

- P_w é a potência mecânica do rotor (W)
- V_w velocidade do vento no centro do rotor (m/s)
- $A=\pi R^2$ superfície varrida pelas pás (m^2)
- R raio das pás (m)
- ρ densidade do ar (kg/m^3) – 1,23 kg/m3
- C_p coeficiente aerodinâmico do rotor (típico = 0,4)

O binário mecânico pode ser calculado a partir de P_w:

$$T_w = \frac{P_w}{\omega_R}$$

Potência disponível

- **O coeficiente, C_p, é a percentagem da Wc da massa de ar incidente no rotor que é convertida em energia mecânica, sendo dada por:**

$$C_p(\lambda,\theta) = 0.22 \times \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \times \theta - 5\right) \times e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}}$$

Onde:

- β ó ângulo de passo da pá (pitch angle)
- λ é a relação de velocidade da pá (tip speed ratio), definida como:

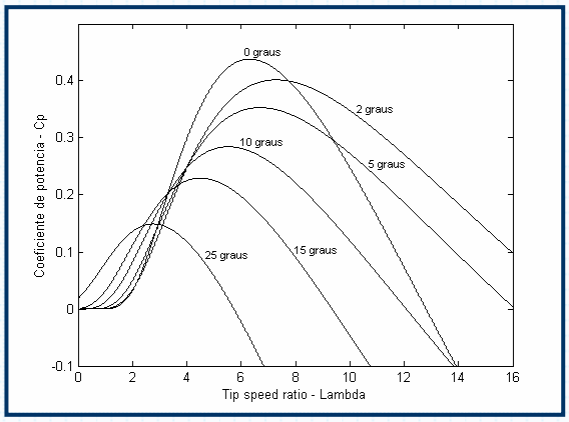
$$\lambda = \frac{R\omega_R}{V_w}$$

Potência Disponível

- **Curvas $C_p = f(\lambda,\theta)$**

Valor máximo teórico:

$C_{p_max} \cong 0.59$



Turbinas de vel. Variável são operadas de forma a obter o melhor rendimento

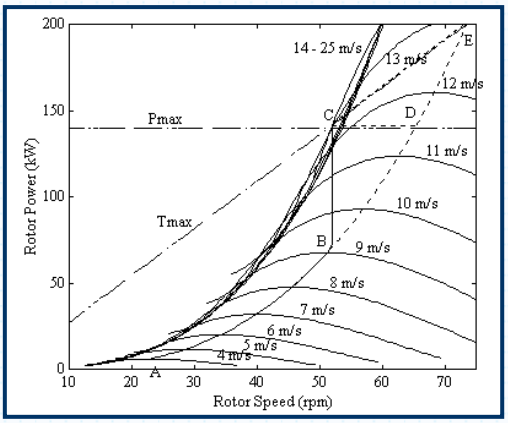
Potência disponível

- **Operação da turbina com máxima potência mecânica**

$$P_{max} = K_{op}\omega^3$$

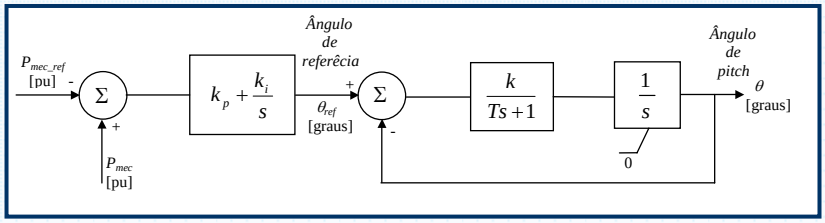
Onde:

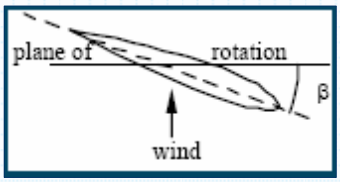
$$K_{op} = \tfrac{1}{2}.\rho.R^5.\pi.\left(\frac{C_p}{\lambda^3}\right)$$



Controlo do ângulo de Pitch

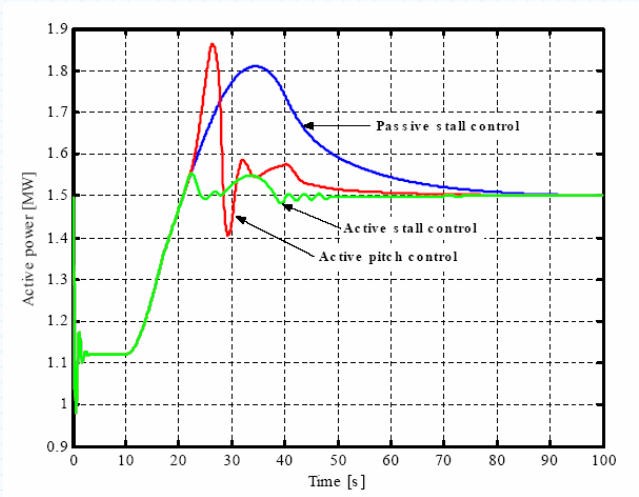
- **Modelização do comportamento do controlo de pitch**



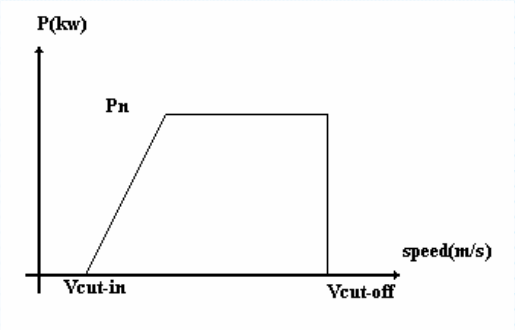


Outras técnicas:
-Active stall (θ negativo);
-Passive stall

Resposta ao controlo do ângulo das pás

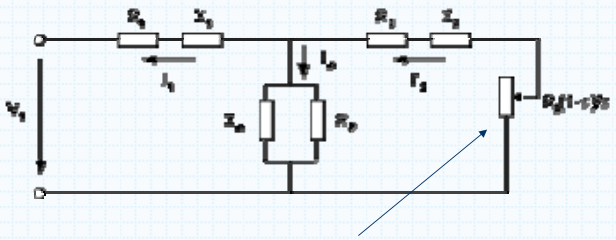


Potência disponível



Comportamento do Gerador de Indução em Regime Estacionário

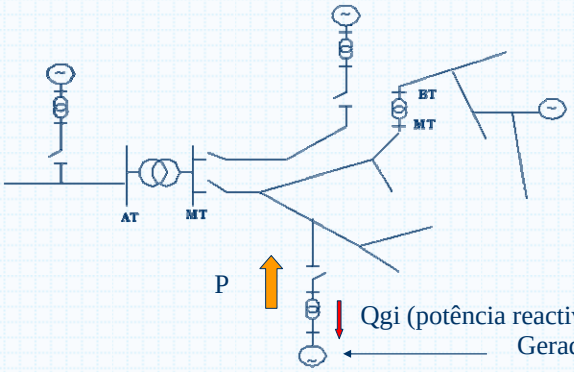
- **O funcionamento de um gerador de indução é em todo semelhante ao de um motor de indução, com a diferença de que funciona em hiper-sincronismo;**
- **Esquema equivalente:**



$$P_M = R_2 |I_2|^2 \frac{1-slip}{slip} \qquad (1)$$

Comportamento do Gerador de Indução em Regime Estacionário

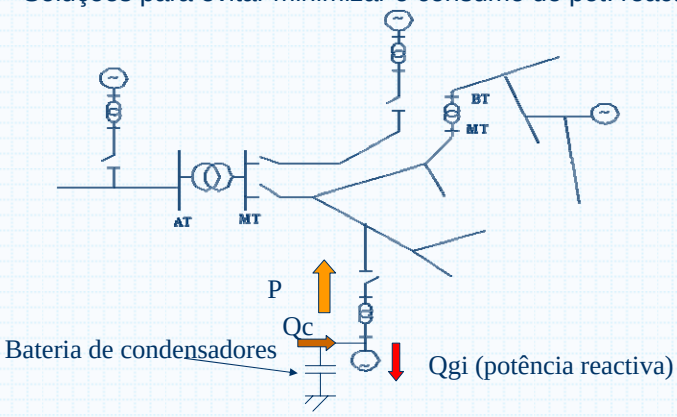
- **Em termos de potências:**



Q – potência "consumida" nas reactâncias da máquina (magnetização + Xs e Xr)

Comportamento do Gerador de Indução em Regime Estacionário

- **Em termos de potências:**
  - Soluções para evitar minimizar o consumo de pot. reactiva



Comportamento do Gerador de Indução em Regime Estacionário

- **Soluções de dimensionamento das baterias de condensadores:**
  - Compensação em vazio;
  - Compensação para factor de potência unitário à plena carga
  - Sobre-compensação para permitir fornecer energia reactiva capacitiva à rede

- **Problemas:**
  - Acréscimo de investimento;
  - Riscos de auto-excitação

Modelo do Gerador de Indução para Estudos de Regime Estacionário

- **A integração dos aerogeradores de indução pode requerer a realização de estudos de impacto nas redes eléctricas:**
  - Avaliar a variação dos perfis de tensão;
  - Avaliar a variação das perdas na rede;
  - Avaliar da ocorrência de congestionamentos nos ramos.

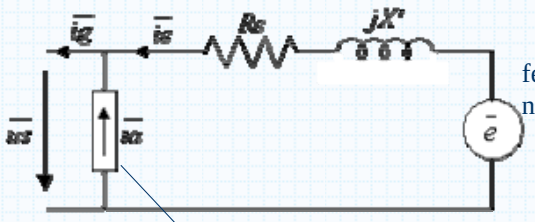
- **Estudos de trânsitos de potências**
- **Representação dos geradores de indução convencionais em estudos de TP:**
  - Barramentos PQ
  - Barramentos PQ modificados:
    - **Barras PX**
    - **Barras RX**
  - Alterações nos algoritmos de cálculo do TP

Modelo Matemático para Estudos Dinâmicos

- **No modelo dinâmico de geradores assíncronos é usual definir um conjunto de pressupostos e simplificações:**
  - ✓ A taxa de variação do fluxo magnético do estator ($d\lambda/dt$) é desprezada;
  - ✓ O rotor apresenta uma estrutura simétrica;
  - ✓ A força elástica e a força resultante de torção do eixo da máquina são desprezados;
  - ✓ A saturação magnética é desprezada;
  - ✓ A distribuição dos fluxos é considerada sinusoidal;
  - ✓ As perdas mecânicas são desprezados.
- **Estas simplificações reduzem a complexidade da modelização, sem comprometer a qualidade dos resultados em estudos de comportamento dinâmico**

Modelo Matemático para Estudos Dinâmicos

- **Modelo simplificado para efeito de estudos dinâmicos**



fem induzida no rotor

Quando existirem também conversores electrónicos

Modelos eléctricos

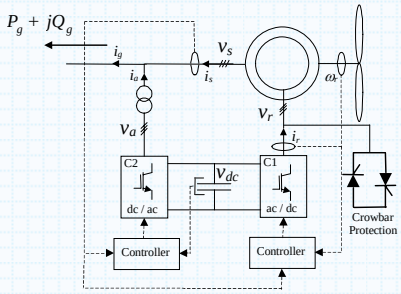
- **Gerador assíncrono convencional (modelo de 3º ordem)**

$$\begin{cases} \dfrac{de_d}{dt} = -\dfrac{1}{T_o}\left[e_d - \left(X - X'\right)i_{qs}\right] + s\omega_s e_q - \omega_s \dfrac{L_m}{L_{rr}} v_{qr} \\ \dfrac{de_q}{dt} = -\dfrac{1}{T_o}\left[e_q + \left(X - X'\right)i_{ds}\right] - s\omega_s e_d + \omega_s \dfrac{L_m}{L_{rr}} v_{dr} \end{cases}$$

Electrical behavior		Mechanical behavior
$\begin{cases} \dfrac{\partial E'_{re}}{\partial t} = 2\pi f \times s \times E'_{im} - \dfrac{1}{T_0} \times \left(E'_{re} - (X - X') \times I_{im}\right) \\ \dfrac{\partial E'_{im}}{\partial t} = -2\pi f \times s \times E'_{re} - \dfrac{1}{T_0} \times \left(E'_{im} + (X - X') \times I_{re}\right) \end{cases}$	$\begin{cases} V_{re} = E'_{re} - R_e \times I_{re} + X' \times I_{im} \\ V_{im} = E'_{im} - X' \times I_{re} - R_e \times I_{im} \end{cases}$	$\dfrac{\partial \omega}{\partial t} = \dfrac{\pi f}{H} \times \left(P_{mec} - P_g\right)$
$X' = X_e + \dfrac{X_m \times X_r}{X_m + X_r}; \quad X = X_e + X_m; \quad T_0 = \dfrac{X_r + X_m}{(2\pi f_0) \times R_r}$	$P_g = E'_{re} \times I_{re} + E'_{im} \times I_{im}$ $Q_g = E'_{im} \times I_{re} - E'_{re} \times I_{im}$ $s = \dfrac{2.\pi.f - \omega}{2.\pi.f}$	

Gerador Assíncrono Duplamente Alimentado

- **Gerador assíncrono:**
  - Directamente ligado à rede;
  - Ligado à rede via DC;
  - Com controlo dinâmico de deslizamento;
  - Double-fed induction machine

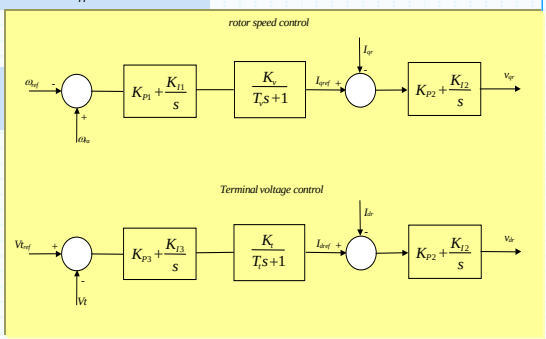


Modelos Eléctricos

- **Geradores assíncronos duplamente alimentados**

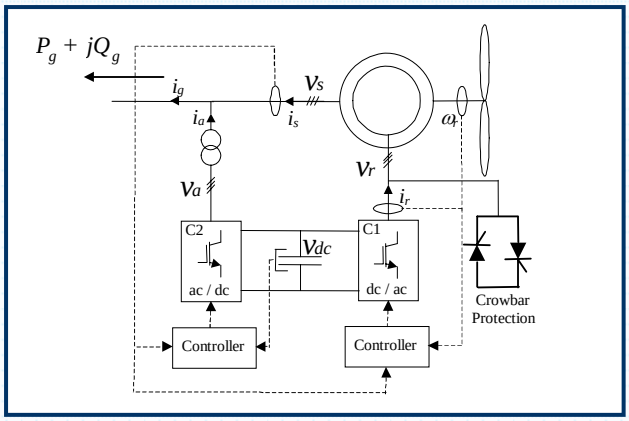
$$\begin{cases} \dfrac{de_d}{dt} = -\dfrac{1}{T_o}\left[e_d - \left(X - X'\right) i_{qs}\right] + s\omega_s e_q - \omega_s \dfrac{L_m}{L_{rr}} v_{qr} \\ \dfrac{de_q}{dt} = -\dfrac{1}{T_o}\left[e_q + \left(X - X'\right) i_{ds}\right] - s\omega_s e_d + \omega_s \dfrac{L_m}{L_{rr}} v_{dr} \end{cases}$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_m - T_e)$$



Modelo eléctrico

- **Esquema genérico de controlo de geradores DFIM**



Equações Algébrica e Dinâmicas

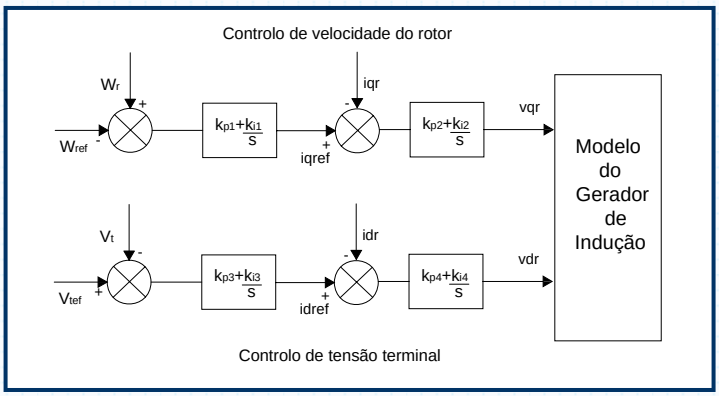
Observações importantes:

- **As grandezas do gerador de indução podem ser controladas através de injecções de tensões controladas a partir do rotor. Na modelização adoptada a dinâmica do rotor é assim considerada;**

- **Há modelos em que a máquina é suposta controlada por injecções de correntes e o modelo matemático é definido apenas por equações algébricas.**

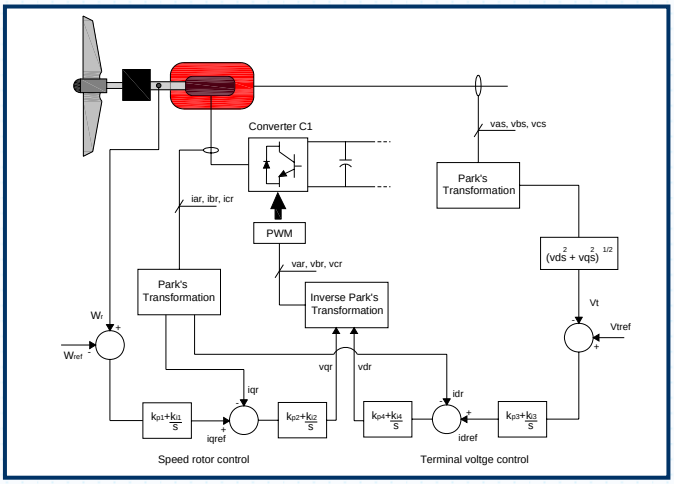
Função dos Controladores

- **As tensões controladas do rotor podem ser obtidas a partir de controladores PI's.**



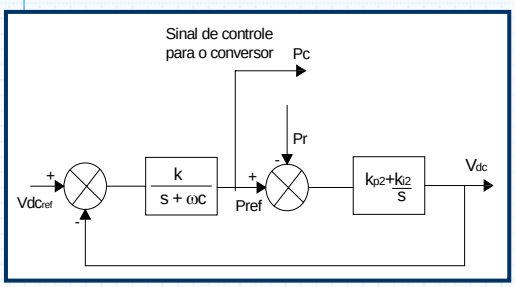
Função dos Controladores

- **Esquema de controle do Conversor ligado ao rotor**



Função dos Controladores

- **Controlo da tensão do *link DC***



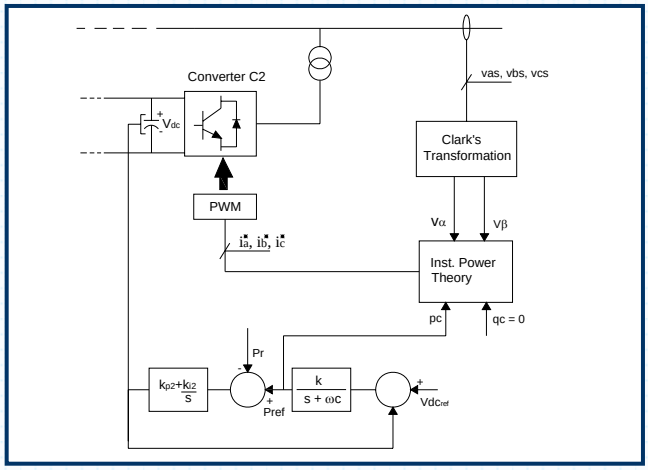
Sinais de correntes de referência de controle a partir das potencias activa e reactiva de referência

Teoria da potência Instantânea

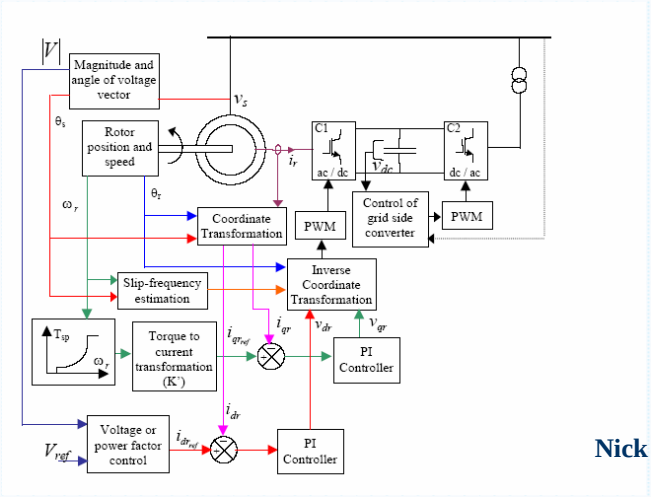
$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_\alpha(t) & v_\beta(t) \\ -v_\beta(t) & v_\alpha(t) \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} p_c(t) \\ q_c(t) \end{bmatrix}$$

Função dos Controladores

- **Esquema de controle do Conversor ligado à rede eléctrica**



Controlo optimizado



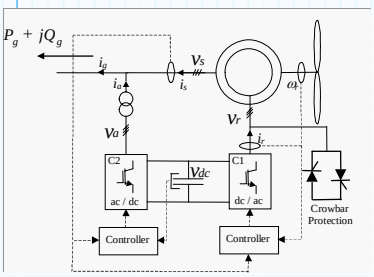
Nick Jenkis etal.

Função dos Controladores

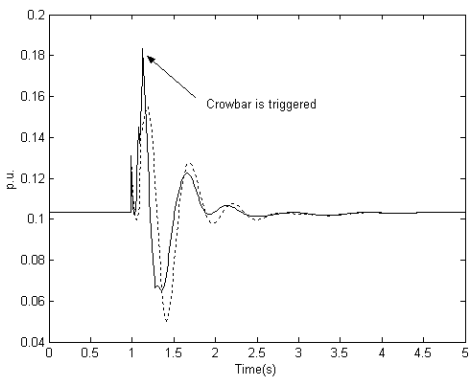
- **Potências activa e reactiva do gerador podem ser controladas utilizando-se a mesma configuração referente as malhas de controlo de velocidade e de tensão terminal.**
- **Além do controlo da máquina através dos conversores, a turbina também pode ser controlada pelo controlo de *pitch*. O controlo do *pitch* ser utilizado para limitar a velocidade rotacional ou a potência mecânica em limites estabelecidos.**

Modelos eléctricos

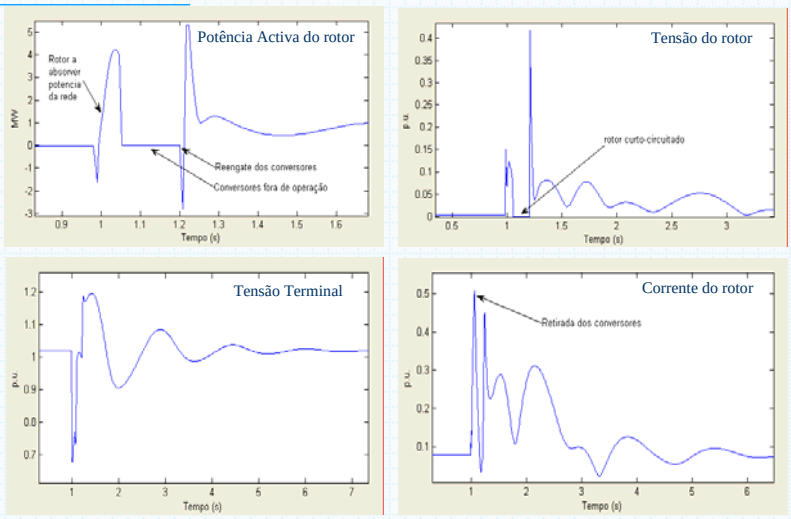
- **Gerador assíncrono duplamente alimentado (Operação do crow bar)**



Tem como objectivo garantir a integridade física dos conversores;



Operação do crow-bar



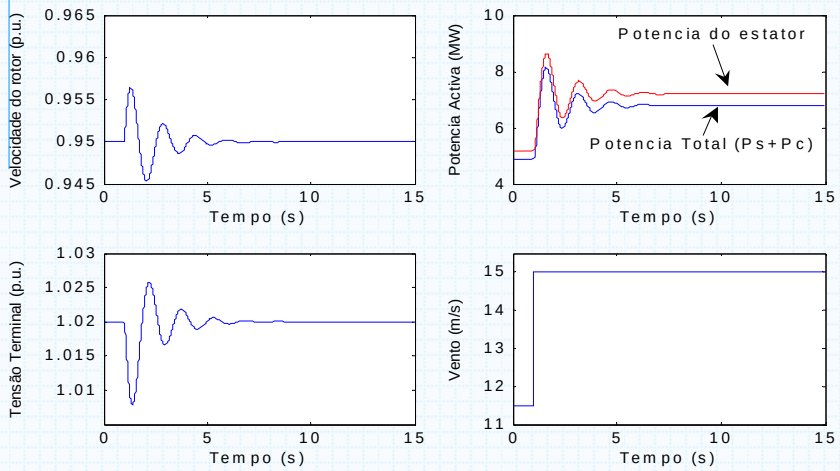
Resultados da Operação com controlo clássico PI

- **Comportamento perante súbito acréscimo da velocidade do vento:**
  (a) Regime sub-síncrono (ω_r = 0.95 e V_t = 1.02);
  (b) Regime hiper síncrono (ω_r = 1.05 e V_t = 1.02).

- **Comportamento perante curto-circuito:**
  (c) Regime sub-síncrono (ω_r = 0.95 e V_t = 1.02);
  (d) Regime hiper síncrono (ω_r = 1.05 e V_t = 1.02).

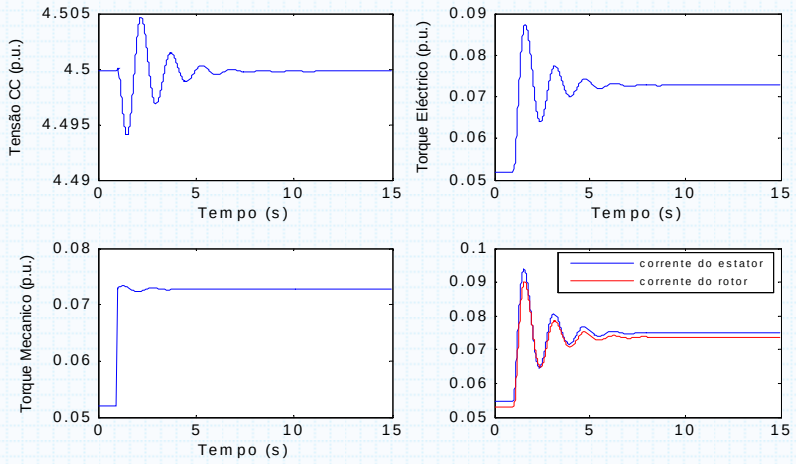
Resultados da Operação com controlo clássico PI

- **Caso (a) - Regime sub-síncrono (ω_r = 0.95 e V_t = 1.02)**



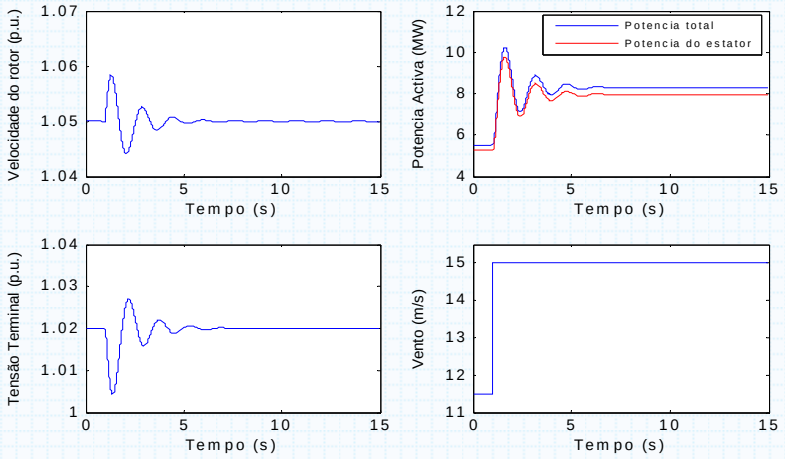
Resultados da Operação com controlo clássico PI

- **Caso (a) – cont.**



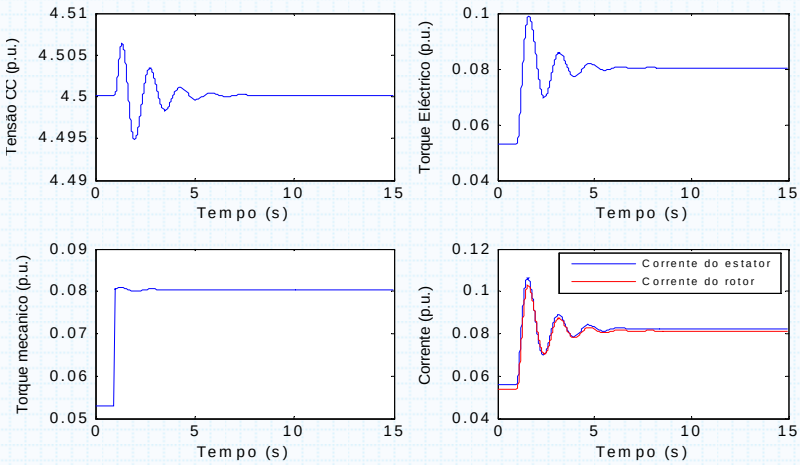
Resultados da Operação com controlo clássico PI

- **Caso (b) - Regime hiper síncrono (ω_r = 1.05 e V_t = 1.02) :**



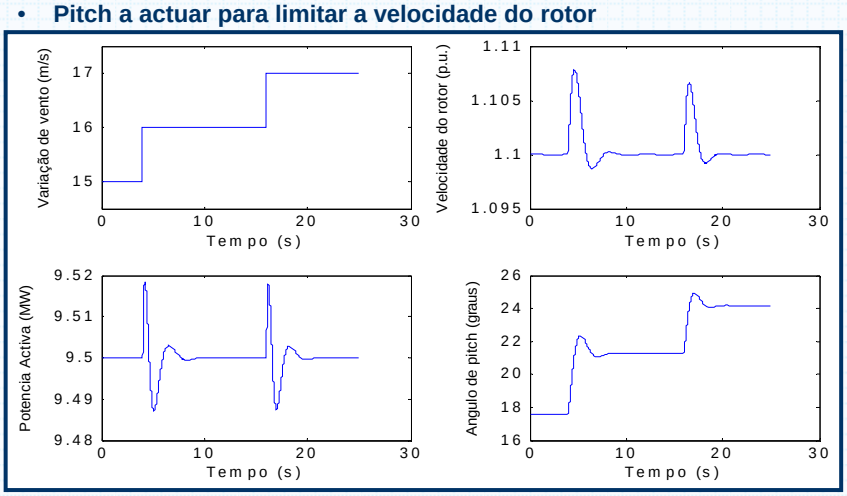
Resultados da Operação com controlo clássico PI

- **Caso (b) – cont.**



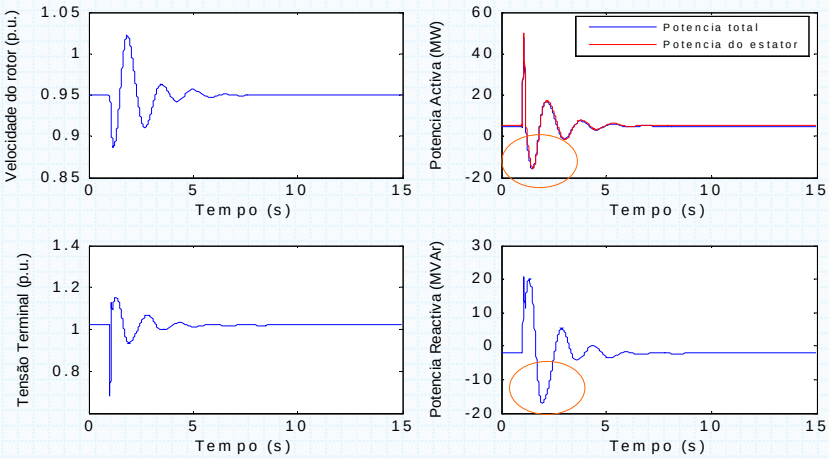
Resultados da Operação com controlo clássico PI

- **Pitch a actuar para limitar a velocidade do rotor**



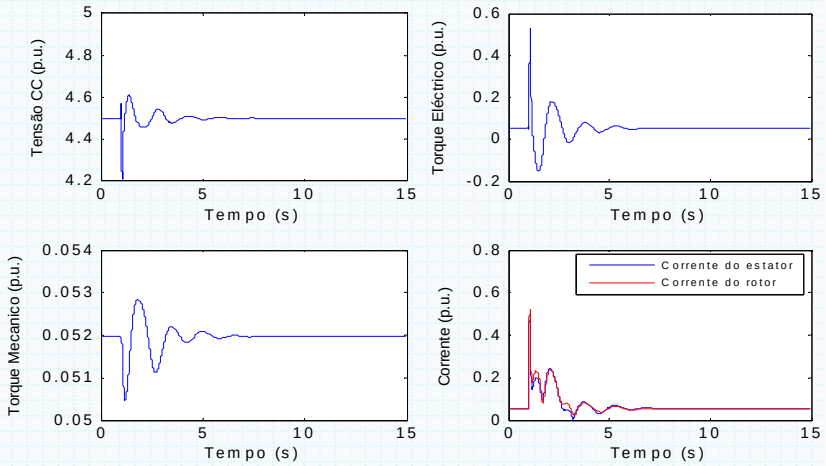
Resultados da Operação com controlo clássico PI

- **Caso (c) - Regime sub-síncrono (ω_r = 0.95 e V_t = 1.02) :**



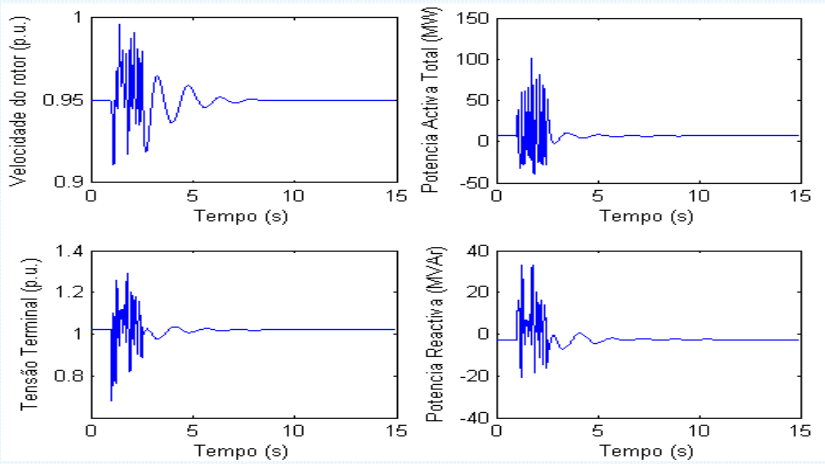
Resultados da Operação com controlo clássico PI

- **Caso (c) – cont.**



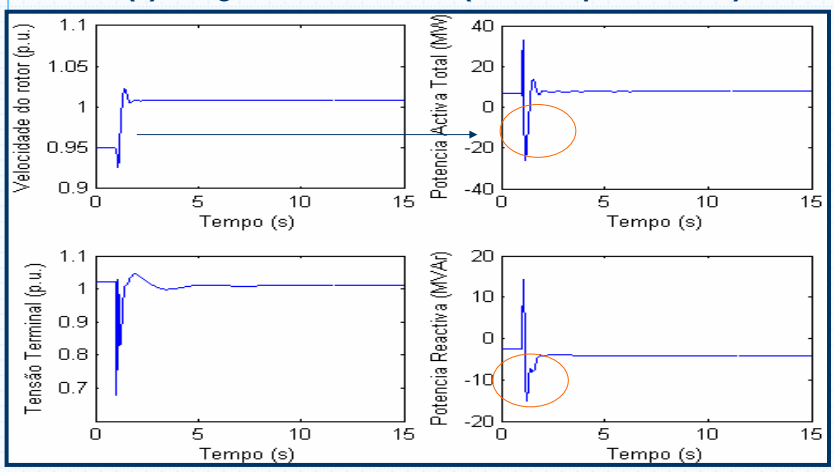
Resultados da Operação

- **Caso (c) - Regime sub-síncrono (com a actuação do crowbar)**



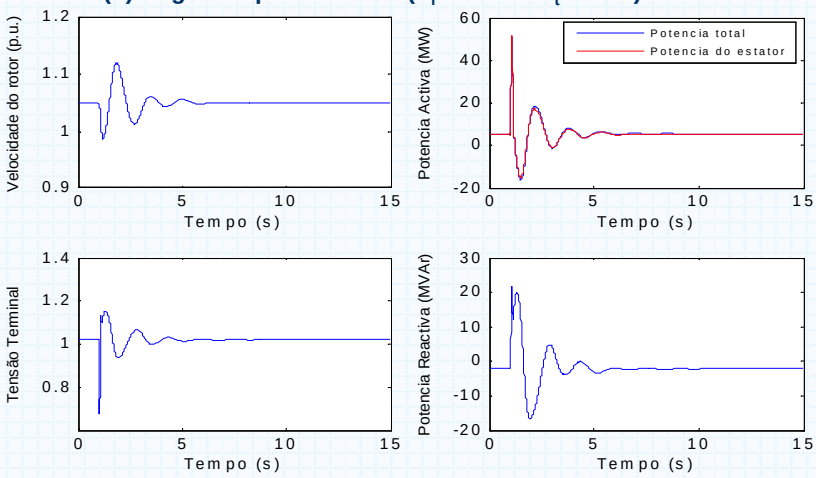
Resultados da Operação

- **Caso (c) - Regime sub-síncrono (crowbar permanente)**



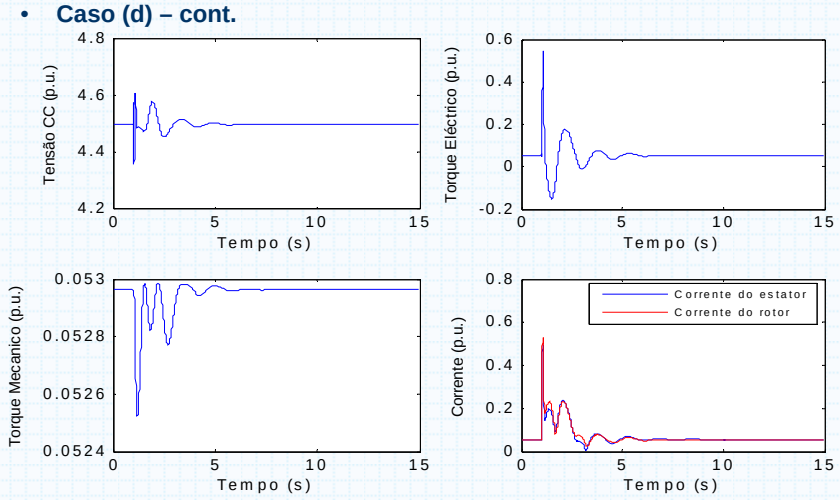
Resultados da Operação com controlo clássico PI

- **Caso (d) Regime hiper síncrono (ω_r = 1.05 e V_t = 1.02) :**



Resultados da Operação com controlo clássico PI

- **Caso (d) – cont.**

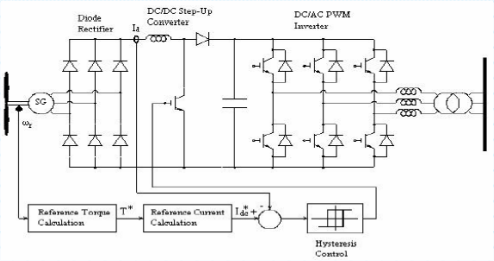


Gerador Síncrono de Velocidade Variável

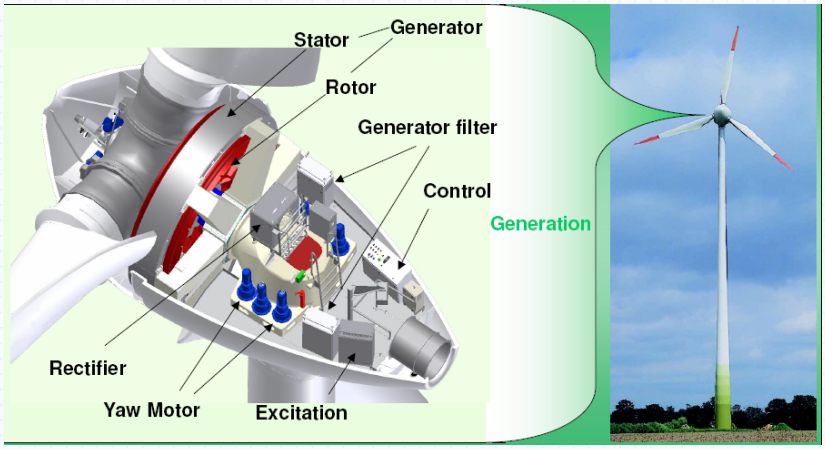
- **A utilização de máquinas síncronas de velocidade variável tem por objectivo a maximização do aproveitamento energético na exploração da energia eólica.**

- **Fabricantes:**
  - Enercon;

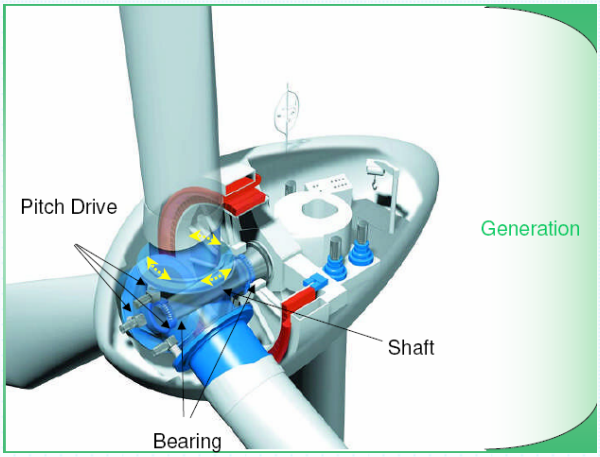
- **O conceito**



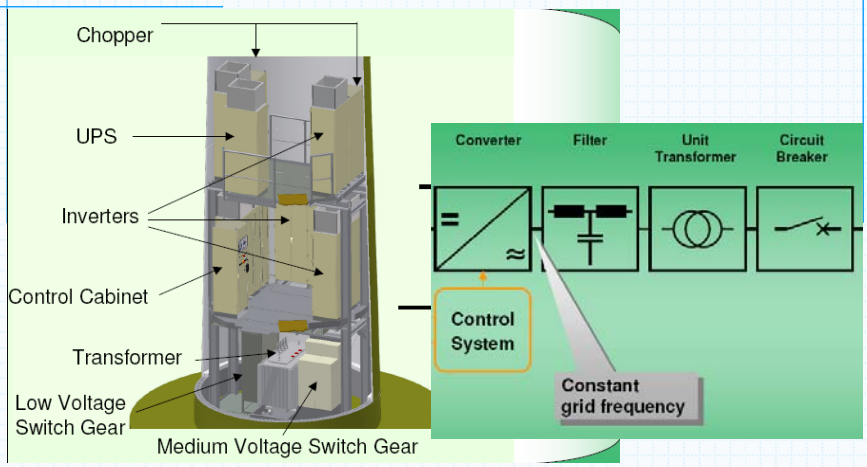
Gerador Síncrono de Velocidade Variável



Gerador Síncrono de Velocidade Variável



Gerador Síncrono de Velocidade Variável



Modelo do Gerador Síncrono de Velocidade Variável

- **Modelo simplificado onde:**
  - O modelo aerodinâmico é igual ao utilizado nas máquinas assíncronas

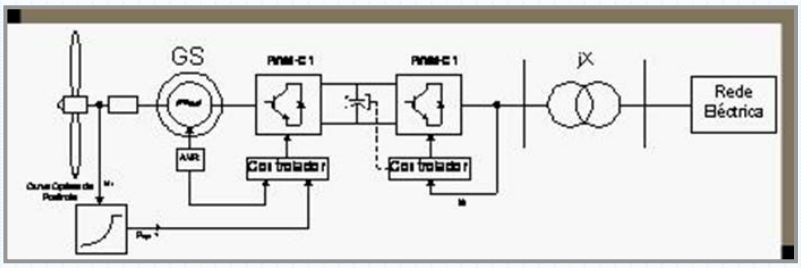
$$P_w = \frac{1}{2}\rho c_p(\lambda,\theta) A V_w^3$$

  - No gerador síncrono são desprezados os fenómenos transitórios rápidos;
  - O conversor é considerado ideal;
  - Apenas são considerados ás interacções da turbina com a rede e os seus sistemas de controlo

- **Em estudos de TP o GSVV pode ser representado como um nó tipo PQ (ou em situações em que o sist de controlo esteja preparado, como um nó PV).**

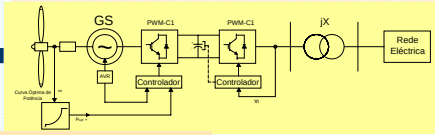
Modelo do Gerador Síncrono de Velocidade Variável

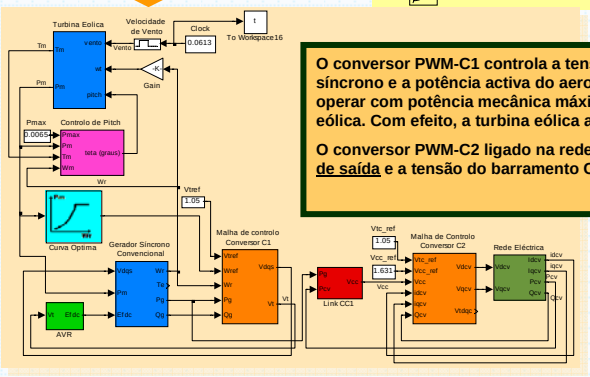
- **Outros Modelos Possíveis**



Modelo do Gerador Síncrono de Velocidade Variável

Representação em Simulink/Matlab





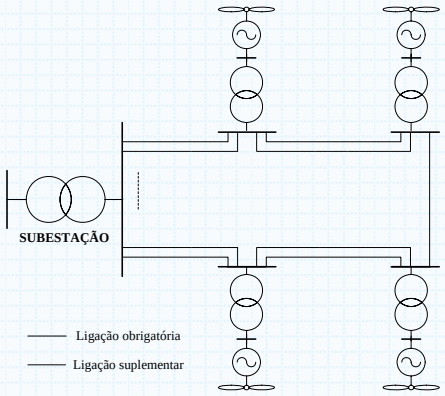
O conversor PWM-C1 controla a tensão de campo do gerador síncrono e a potência activa do aerogerador GSVV de modo a operar com potência mecânica máxima extraída da turbina eólica. Com efeito, a turbina eólica apresenta controlo de *pitch*.

O conversor PWM-C2 ligado na rede eléctrica <u>controla a tensão de saída</u> e a tensão do barramento CC

- **Lay-out de parques eólicos**
- **Controlo de Geração**

Lay-out de parques eólicos

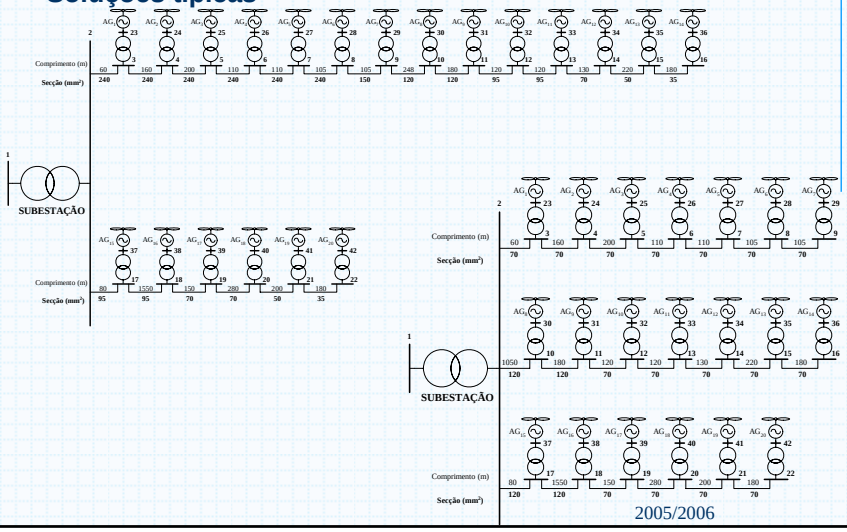
- **Solução genérica usual**



Optimização da solução:
- Escolha dos cabos;
- Admitir ligações alternativas

Lay-out de parques eólicos

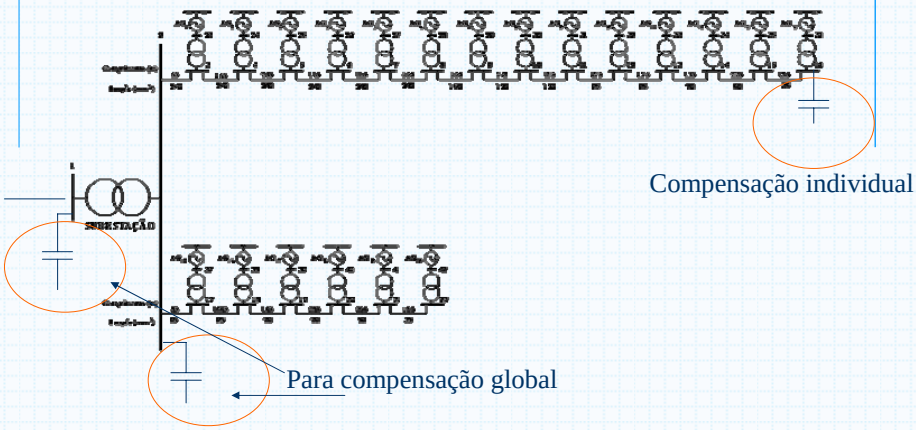
- **Soluções típicas**



2005/2006

Lay-out de parques eólicos

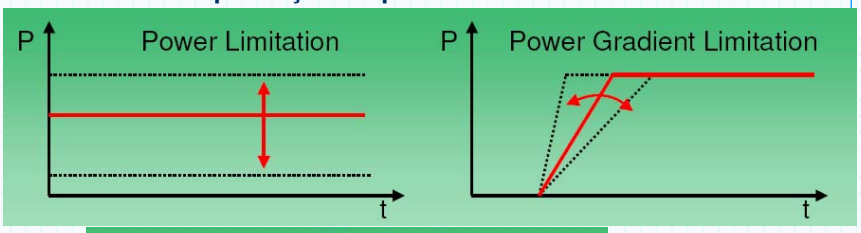
- **Instalação de baterias de condensadores (com escalões)**

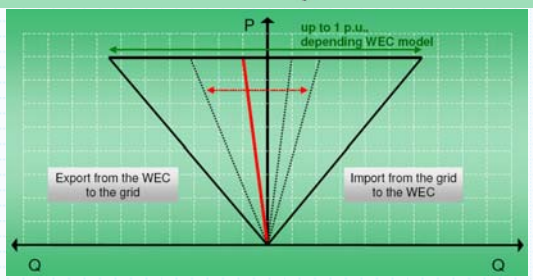


2005/2006

Tipos de Controlo

- **Controlo de produção de potência activa e reactiva**

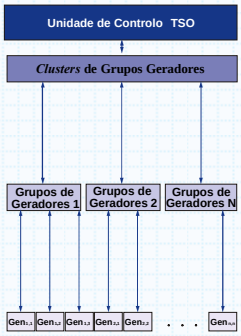




Tipos de Controlo

- **Resposta de um cluster de parques eólicos a variações de frequência da rede (participação no controlo de primário de frequência: controlo inercial, equilíbrio geração / consumo) e set-points (P,Q) impostos pelo despacho;**

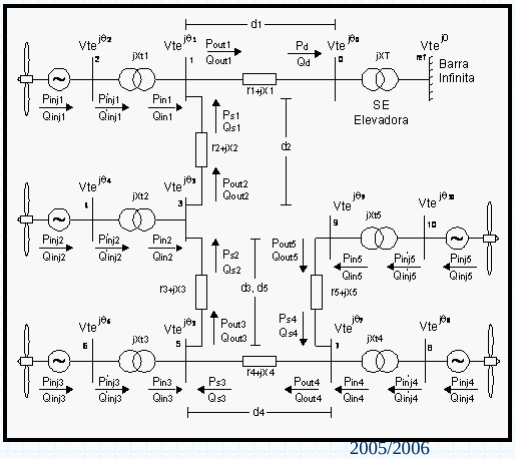
Clusters de Grupos Geradores	**Requisitos de Operação** •Garantiade Fornecimento de quantidades de energia •Fornecimento de Serviços de Sistema (Pot. reactiva e reservas) •Minimização de desvios em programas de produção
Grupo de Geradores	**Requisitos de Operação** •Limitação de potência a injectar •Controlo de tensão e potência reactiva •Cut-off de emergência (desconexão) por períodos de interrupção de serviço da rede •Procedimentos de entrada e saída de serviço coordenados (limitação do gradiente – *damping*)
Gerador Simples	**Requisitos de Operação** •Operação segura e confiável •Máxima produção de energia •Redução de pertubações na qualidade da onda



Tipos de Controlo

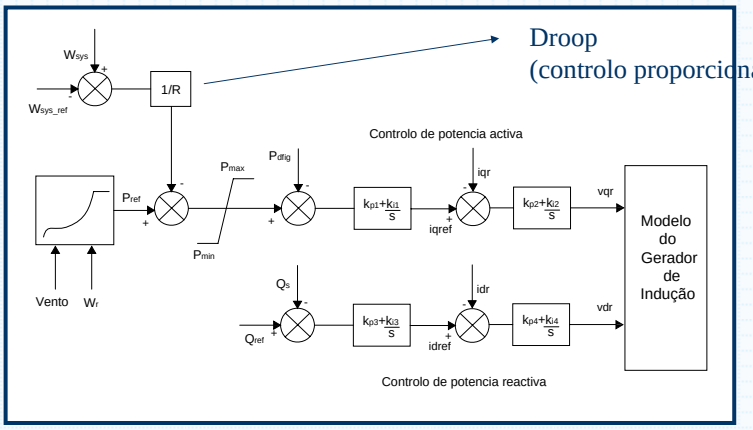
- **Controlo no ponto de ligação do parque à rede → Despacho dos aerogeradores (P, Q) e baterias de condensadores**

Tomar em consideração as perdas internas no parque.



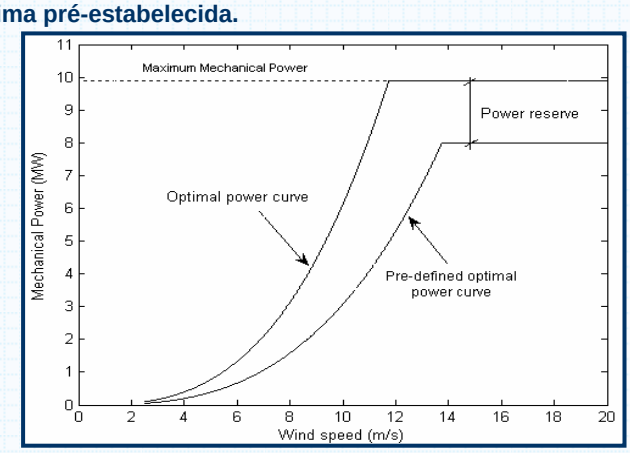
Definição de condições técnicas especiais

- **Caracterização do controlo inercial**



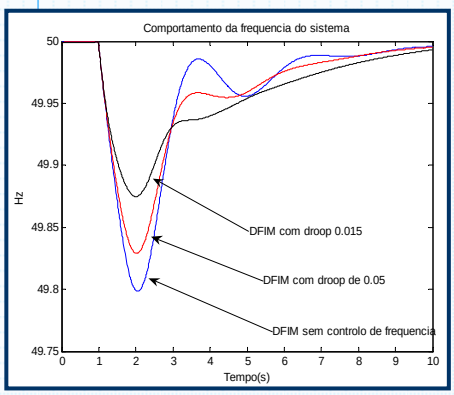
Definição de condições técnicas especiais

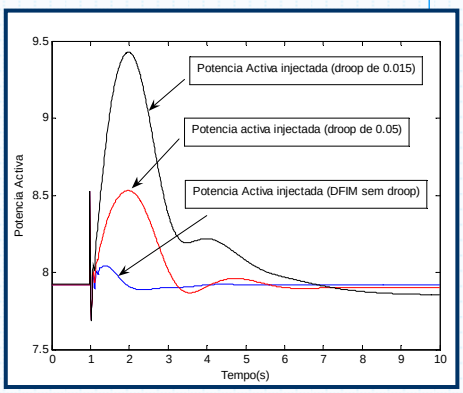
- **A Potência activa injectada pelos conversores deve seguir uma curva óptima pré-estabelecida.**



Definição de condições técnicas especiais

- **Resposta do cluster perante variação de carga no sistema**

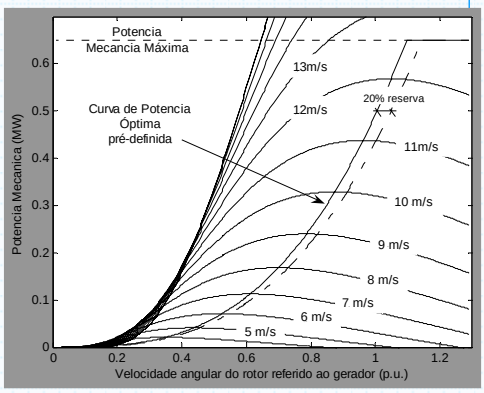




Participação dos DFIWG no equilíbrio de geração / consumo

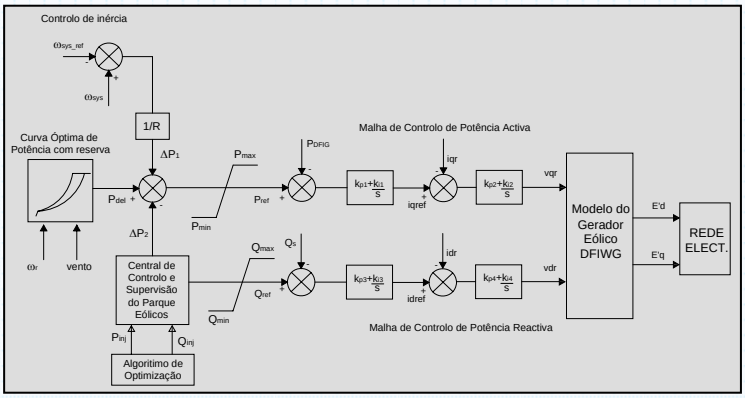
- **Curvas de Potência Máxima com reserva.**

Para que os aerogeradores possam aumentar a sua geração quando persistir um erro de frequência é necessários que os geradores eólicos operem com curvas de potência máxima com margem de reserva ->



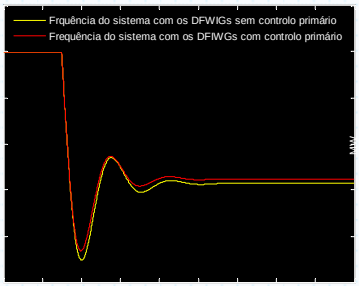
Participação dos DFIWG no equilíbrio de geração / consumo

- **Esquema de controlo do aerogerador DFIWG com margem de reserva de potência**
- **- A margem de reserva possibilita também que o DFWIG responda a uma solicitação de potência do operador do parque eólico**

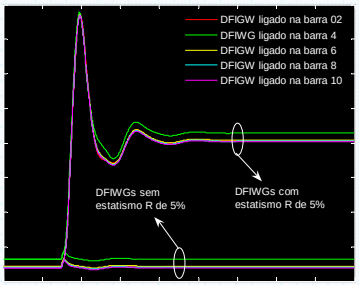


Resultados de um caso de estudo

- **Comportamento dos aerogeradores DFWIG com e sem controlo primário de frequência**



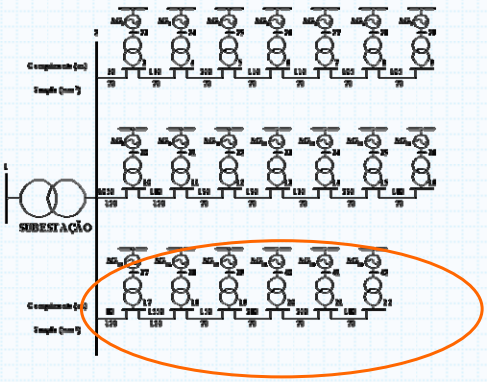
Frequência do sistema



Potência activa injectada de cada DFIWG

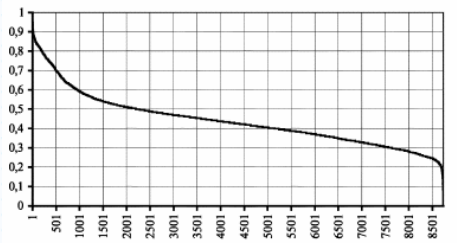
Sobre-equipamento de parques eólicos

- **Instalar ΣS > Capacidade do ponto de interligação**



Produção esperada

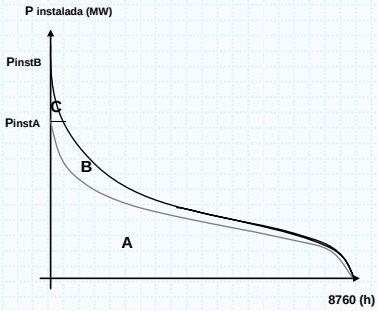
- **A potência instalada tem uma probabilidade baixa de vir a ser produzida**



Curva de duração da produção anual
de um parque eólico normalizada para a potência instalada

Aumento da produção de energia

- **Aumento da potência instalada**



Curvas de duração da produção anual
de um parque eólico para dois valores de potência instalada

Protecções

- **As protecções são de dois tipos:**
  - Protecções dos aerogeradores (dependentes da tecnologia)
  - Protecções de interligação à rede, para “comandar” o disjuntor de interligação.

Protecções

- **Requisitos dos Sistemas de Protecção:**
  - *O PE apenas poderá permanecer ligado à rede se existir tensão nas três fases da rede e estas tensões se encontrem dentro dos limites de operação;*
  - *O PE deve ser desligado da rede pública se uma anomalia ocorrida no sistema provocar desvios não aceitáveis na tensão ou na frequência no ponto de conexão (interligação);*
  - *O PE deve ser desligado da rede se uma ou mais fases da rede é perdida no ponto de conexão;*
  - *O PE deve ser desligado automaticamente ou manualmente da rede de distribuição pública se um qualquer falha de alimentação do equipamento de protecção inibe a sua correcta operação;*
  - *Saída de serviço dos PE quando são detectados defeitos na rede, por forma a garantir a extinção dos arcos eléctricos associados a c.c. fugitivos e permitir o sucesso de religações.*

Protecções de Interligação

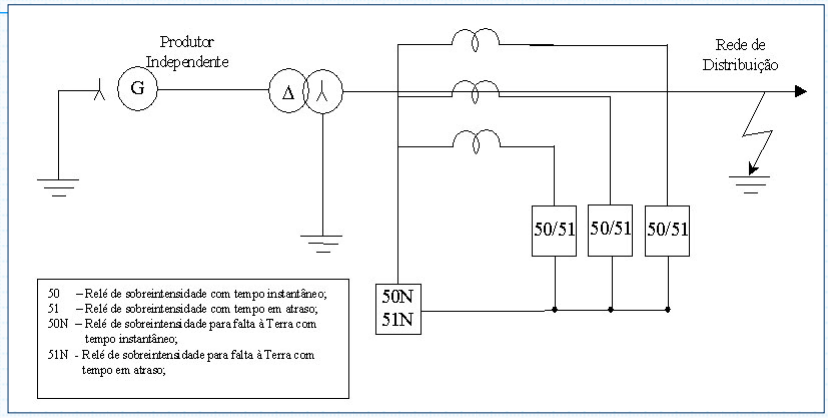
- **A configuração mínima exigida às equipas de protecção consiste nos seguintes relés:**
  - Relés de máximo e mínimo de tensão, 27 e 59;
  - Relés de máximo e mínima de frequência, 81U e 81O;
  - Relés de máximo de intensidade, com tempos de actuação instantâneos, 50, e temporizados, 51;
  - Relés para detecção de defeito à terra com tempos de actuação instantâneos e temporizados, 50N e 51N;

  ou
  - Relé de tensão de sequência de zero ou homopolar, 59N.

Protecções de Interligação

- **Relés de MI asseguram protecção contra defeitos polifásicos e defeitos fase-terra (pouco impedantes) próximo dos PI; Tipos de relés:**
  - Disparo instantâneo ou temporizado
  - Utilização de relés 50V e 51V (MI inst. ou temporizados, controlado por tensão)
  - Detecção de correntes de terra: 50N e 51N

Protecções de Interligação



Protecções de Interligação

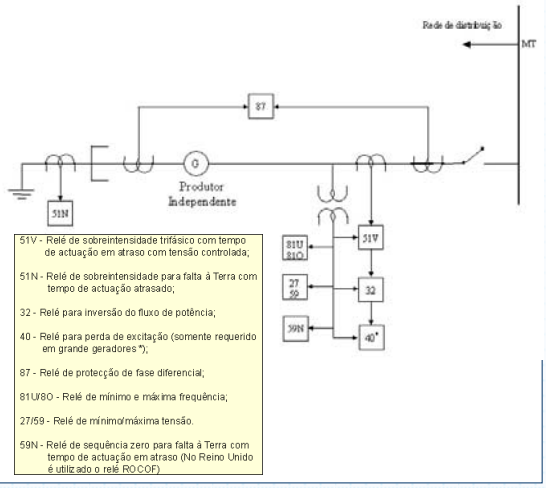
- **Relé de mínimo de tensão (27) é utilizado para detecção de defeitos polifásicos pouco impedantes nas redes; Valor de regulação típico: 0,95 Un;**
- **Relé de máximo de tensão (59) permite detectar sobretensões associadas por exemplo a situação de auto-excitação de geradores assíncronos; Valor de regulação 1,1Un;**

Temporizações instantâneas quando em REE (Regime Especial de Exploração)

- **Relés 81U e 81O utilizados para detectar situações anómalas de exploração das redes; Regulações na Europa:**
  - 47 a 49 Hz, para tempos de actuação (< 1 seg).
  - 50,5 a 52 Hz, para tempos de actuação (< 1 seg).

Protecções de Interligação

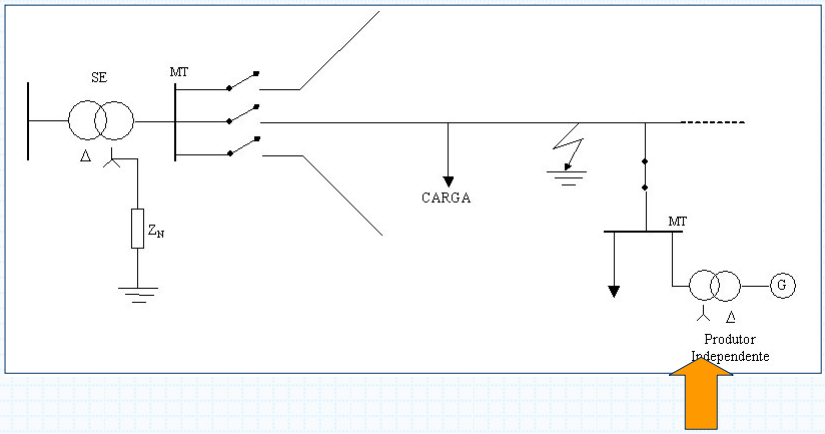
- **Protecção de interligação (50,51,81U, 81O,27,59N)**



50 – MI instantânea
51 – MI temporizada
81U, 81O – min e máx freq.
27 – Máx tensão;
59N – Máx tensão de seq. zero

Protecções de Interligação

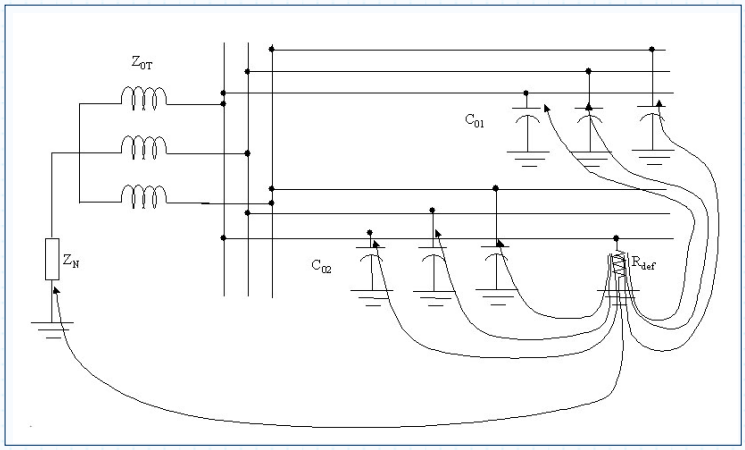
Situações de defeitos fase-terra nas redes distribuição e sub-transmissão



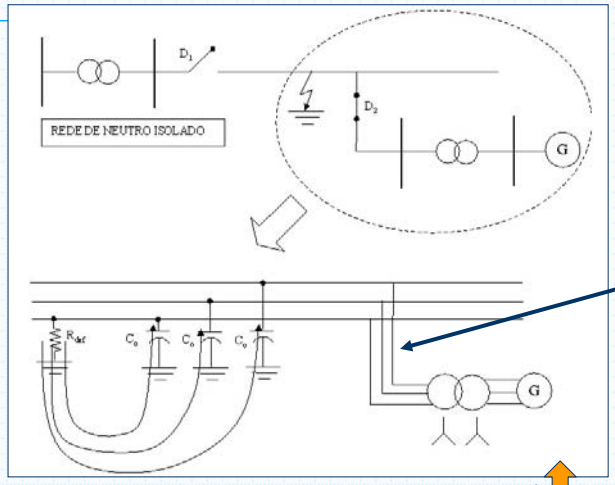
Protecções de Interligação

- **Duas situações podem ocorrer no caso de defeitos Fase-Terra:**
  1. **O defeito é facilmente detectável pelo relé 59N, conduzindo à saída de serviço do PI e do *feeder*, na subestação da rede receptora;**
  2. **O defeito é muito impedante, não provocando a actuação do relé 59N do PI, sendo contudo a situação detectada pelas protecções da subestação que desligam o *feeder,* conduzindo ao funcionamento em rede isolada e em regime de neutro isolado.**

Protecções de Interligação



Protecções de Interligação



$$\overline{V}_o = -\overline{Z}_o.\overline{I}_o$$

$$V_o = \frac{U}{\sqrt{1+9.\omega^2.C_o^2.R_{def}^2}}$$

Problemas: funcionamento intempestivo do relé 59N

Protecções de Interligação – Algumas Recomendações

- **Ligações às redes de 220 kV e 150 kV:**
  - Neste caso, atendendo à ligação directa dos neutros à terra e à utilização das protecções 21/21N e 67N, com teleprotecção, para protecção das entradas de linha, recomenda-se a utilização dos seguintes relés:
    - **Relés de máximo e mínimo de tensão, 27 e 59;**
    - **Relés de máximo e mínimo de frequência, 81U e 810;**
    - **Relés de máximo de intensidade, com tempo de actuação instantâneo, 50, e temporizado, 51;**
    - **Relés para detecção de defeito à terra com tempos de actuação instantâneo e temporizado, 50N e 51N;**
    - **Relés 21 e 21N, associados a teleprotecção, com três zonas;**
    - **Relé de máximo de intensidade direccional de neutro, 67N, complementando as anteriores.**
- **Diálogo com os OS (TSO e DNO) é fundamental!**

Conclusões

- **Tendência para a utilização de máquinas de potências cada vez maiores ---- 2MW; 3MW, 4,5 MW;**
- **Utilização crescente de sistemas baseados em electrónica de potência para optimização da produção e melhor integração no sistema**
  - (alguns problemas presistem contudo);
- **Aparecimento futuro da produção off-shore**
- **Impactos crescentes na operação do sistema;**

→ Novas funcionalidades nos sistemas de gestão e controlo Do tipo EMS e DMS

- **Necessidade de harmonizar a regulamentação e standards para permitir a integração na rede desta produção;**
- **Novas ferramentas de planeamento.**