

EEL 510460 - Tópicos Especiais em Sistemas de Energia Elétrica II:  
Controle de Frequência em Microrredes de C.A.  
Estratégias de Controle de Aerogeradores

Prof. Antonio Simões Costa

UFSC - EEL - LABSPOT

# Potência extraída do vento por uma turbina eólica

A potência elétrica extraída do vento em  $kW$  é dada por:

$$P_m = P_W \times C_P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p(\lambda, \beta)$$

- $P_W$  : potência do vento, em  $kW$ ;
- $\rho$  : densidade do ar, em  $kg/m^3$ ;
- $r$  : raio da área circular varrida pelas pás do rotor, em  $m$ ;
- $v$  : velocidade do vento, em  $m/s$ ;
- $C_p$  : coeficiente de desempenho da turbina eólica;
- $\beta$  : ângulo de deflexão (ângulo de *pitch*);
- $\lambda$  : velocidade específica (*tip speed ratio*), dada por

$$\lambda = \frac{\omega_r r}{v}$$

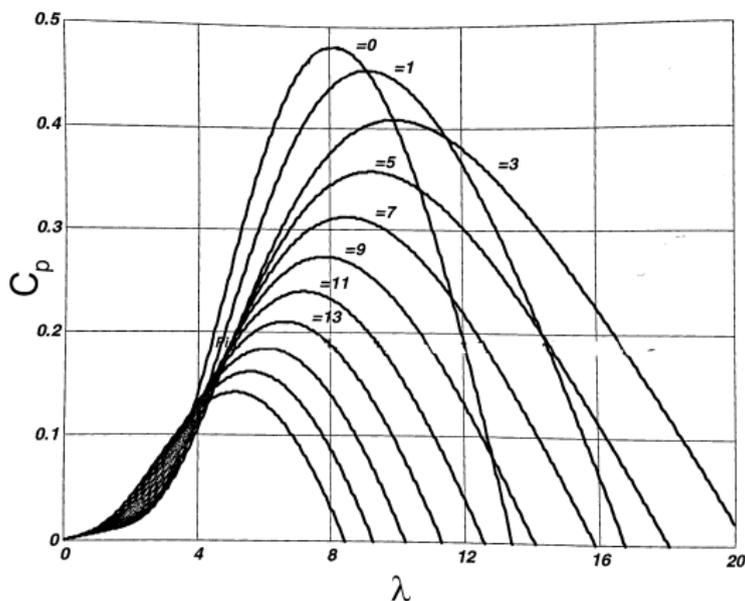
onde  $\omega_r$  é a velocidade mecânica do rotor da turbina, em  $rad/s$ .

## Observações sobre o coeficiente de Desempenho

- É o único parâmetro que pode ser controlado para maximizar a energia extraída do vento pela turbina;
- $C_p$  é limitado superiormente pela lei de Betz ( $C_p < 0,593$ ), mas na prática seu valor máximo é menor do que este limite teórico;
- Para um dado ângulo de deflexão das pás  $\beta$ ,  $C_p$  é função não-linear da velocidade do vento  $v$  :
  - Em  $\lambda = 0$ , o rotor não gira, e portanto  $C_p = 0$ ;
  - $C_p$  atinge um pico a uma dada velocidade específica  $\lambda$ ;
  - Cai novamente a zero para altos valores de  $\lambda$  (a altas velocidades, o rotor gira tão rápido que é visto pelo vento como um disco sólido: o vento flui ao redor do rotor e assim não há extração de energia).
- A curva característica de  $C_p$  depende do fabricante;
- O efeito de se alterar o ângulo de passo  $\beta$  muda as características do aerogerador (tudo se passa como se fosse “uma outra turbina”).

# Curva típica coef. de desempenho x veloc. específica

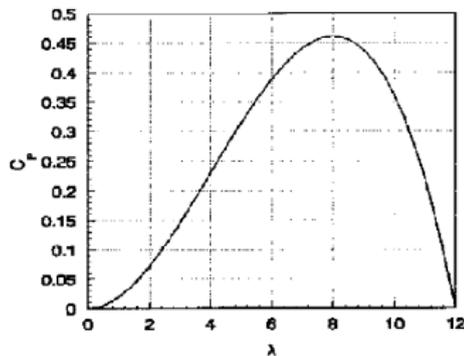
(Parametrizada pelo ângulo de passo)



Ação de controle de  $\beta$  implica sempre em vertimento de vento, e portanto em redução de  $C_p$ .

# Estratégias de controle de velocidade do rotor

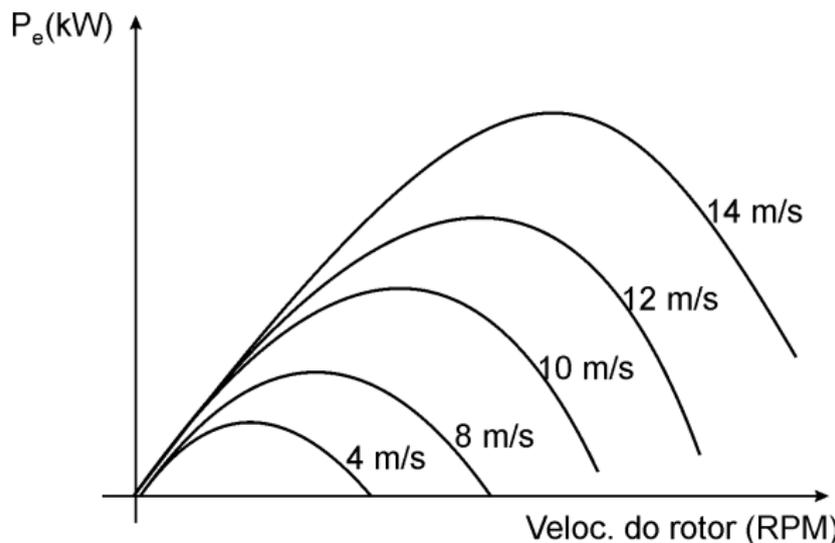
- Com as tecnologias DFIG e *Full Converter*, é possível controlar a velocidade específica (TSR). Para isso a veloc. do rotor,  $\omega_r$ , deve ser ajustada para variar conforme a velocidade do vento;
- A veloc. do rotor pode então ser controlada via controle da diferença entre a potência mecânica,  $P_m$ , e a potência elétrica  $P_e$  de saída:
  - Controle de  $P_m$ : via ajuste do âng. de passo  $\beta$ ;
  - Controle de  $P_e$ : via ação dos conversores de EP.
- Com  $\beta$  fixo,  $C_p$  dependerá apenas da veloc. especif.  $\lambda \Rightarrow$



## Característica potência produzida x velocidade

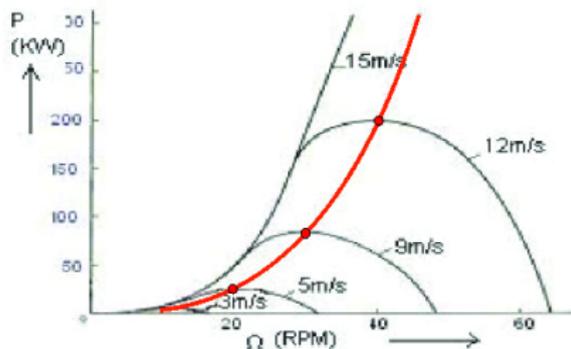
- Supondo  $\beta$  fixo, teremos um família de curvas  $P_m \times \omega_r$ , uma para cada velocidade de vento  $v_k$  :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v_k^3 C_p \left( \frac{\omega_r r}{v_k} \right)$$



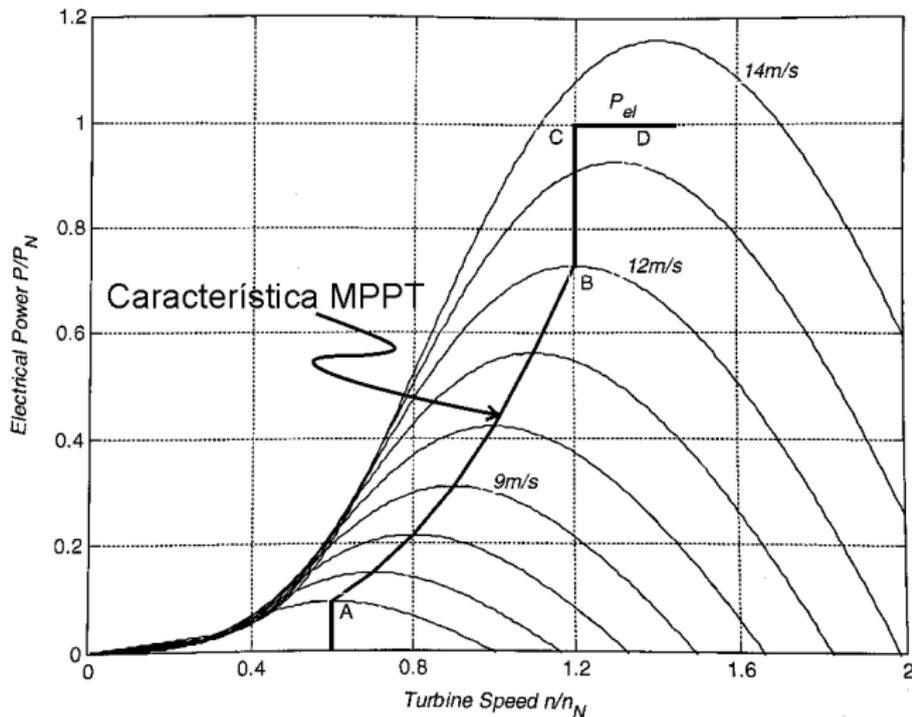
# Rastreamento do Ponto de Máximo Desempenho (MPPT)

- A velocidades baixas/médias de vento ( $10 - 15 \text{ m/s}$ ), a velocidade do rotor é ajustada para que a turbina opere em condições ótimas (Max. Power Point Tracking, MPPT):



- Para isto, a velocidade do rotor deve acompanhar a velocidade do vento (isto é, a turbina deve operar a **velocidade específica constante**);
- Sob velocidades altas de vento ( $v > 15 \text{ m/s}$ ), o ângulo de passo é controlado para “verter” parte da energia aerodinâmica;
- Acima de  $20 - 25 \text{ m/s}$ , as turbinas eólicas são completamente retiradas de operação.

# Potência elétrica x velocidade para toda a faixa operativa



# Observações finais sobre o MPPT

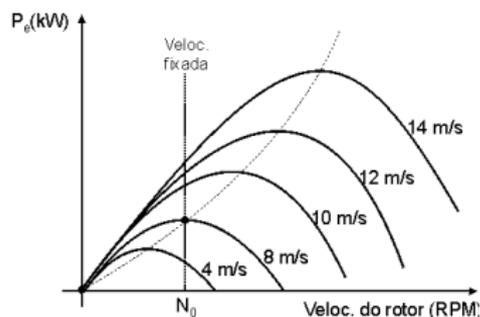
- Como:
  - A potência primária do vento é proporcional ao cubo da velocidade, e
  - O coeficiente  $C_p$  é mantido constante em seu valor ótimo fazendo-se  $\lambda = \omega_r r / v$  constante, então, durante o MPPT a velocidade do rotor é aproximadamente proporcional à velocidade do vento;
- Conseqüentemente

$$P_m = k_{opt} \omega_r^3$$

onde  $k_{opt}$  depende da frequência da rede, escorregamento na potência máxima, número de polos, velocidade do vento à potência nominal, e relação de engrenagens.

# Turbinas com velocidade fixada

- Neste caso há somente uma veloc. de vento para a qual a razão entre velocidade do vento e velocidade rotacional é ótima:



- No exemplo mostrado, esta velocidade é de  $8 \text{ m/s}$ , e a velocidade da turbina é  $N_0$ ;
- A velocidades de vento mais baixas, a veloc. rotacional é demasiado alta para se alcançar o desempenho ótimo;
- A velocidades de vento mais altas, a veloc. rotacional é demasiado baixa;
- Ambas as situações resultam em desempenhos sub-ótimos.

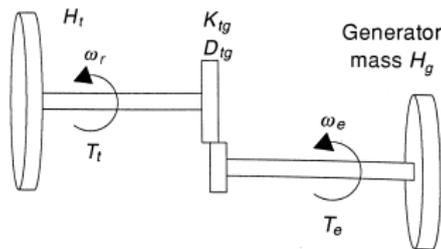
# Modelagem de aerogeradores DFIG

- O controle da velocidade do rotor de aerogeradores é em grande parte efetuado mediante ajustes no torque elétrico aplicado ao eixo das máquinas;
- Para compreensão de quais variáveis devem sofrer ações de controle de modo a promover os ajustes desejados no torque elétrico, é necessário ter noções sobre a modelagem eletromecânica de turbinas e máquinas elétricas utilizadas nos aerogeradores;
- Concentraremos as atenções no modelo elétrico de aerogeradores do Tipo 3 (DFIG).

# Modelo do Acionamento mecânico de aerogeradores DFIG

- O sistema de acionamento mecânico de aerogeradores é composto por: **massas girantes**, **eixo** e **caixa de engrenagens**;
- Para estudos de controle, utiliza-se modelo de 2 massas girantes;
- O modelo de duas inércias e as equações correspondentes são:

Wind Turbine Mass



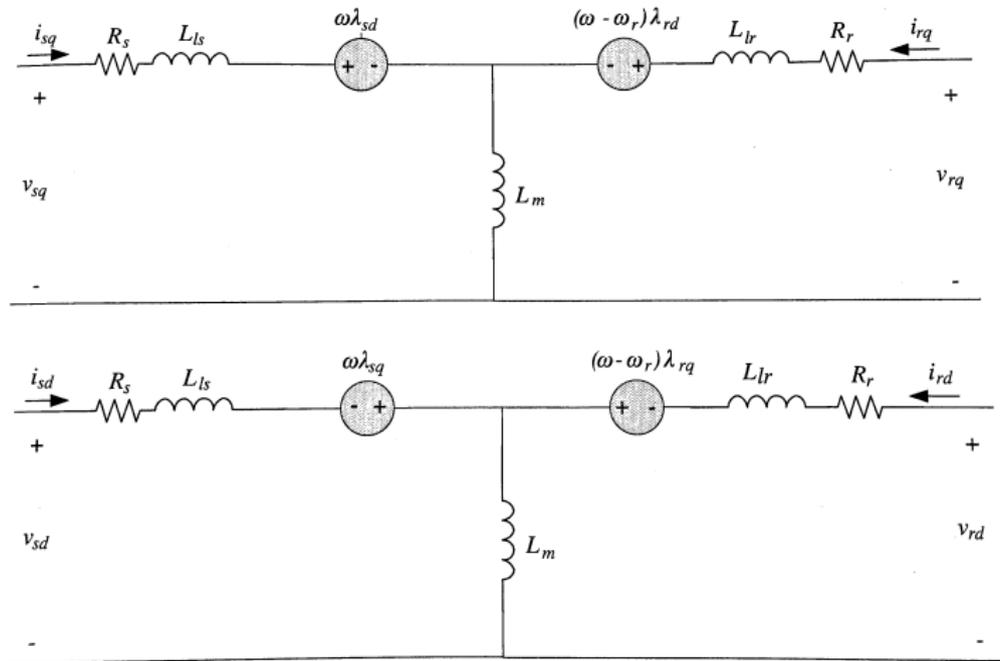
$$\begin{cases} 2H_g\dot{\omega}_e = D_{tg}(\omega_r - \omega_e) + K_{tg}(\theta_r - \theta_g) - T_e \\ 2H_t\dot{\omega}_r = T_m + D_{tg}(\omega_e - \omega_r) - K_{tg}(\theta_e - \theta_r) \end{cases}$$

- Nas equações acima, todas as variáveis estão em *p.u.*, em bases consistentes.

# Modelo do gerador DFIG

- Os modelos de máquinas elétricas usadas em microrredes em geral utilizam transformação de Park, e suas variáveis são referidas aos eixos  $d$ - $q$ ;
- **Vantagens:** indutâncias tornam-se invariantes no tempo, variáveis comportam-se com quantidades “dc”;
- Variáveis relevantes (*todas as quantidades do rotor referidas ao estator*):
  - Tensões do estator,  $v_{sd}$  e  $v_{sq}$ , e tensões do rotor,  $v_{rd}$  e  $v_{rq}$ ;
  - Correntes do estator,  $i_{sd}$  e  $i_{sq}$ , e tensões do rotor,  $i_{rd}$  e  $i_{rq}$ ;
  - Fluxos magnéticos no estator,  $\psi_{sd}$  e  $\psi_{sq}$ , e fluxos no rotor  $\psi_{rd}$  e  $\psi_{rq}$ ;
- Parâmetros (*parâmetros do rotor ref. ao estator*): resistências  $R_s$  e  $R_r$ , indutâncias de dispersão  $L_{\ell s}$  e  $L_{\ell r}$ , indutância mútua  $L_m$ ;
- Velocidades: veloc. de referência,  $\omega$ , e velocidade do rotor,  $\omega_r$ .

# Circuitos equivalentes do DFIG nos eixos d-q



# Equações das Tensões e Fluxos

- As equações de tensão e fluxo obtidas dos circuitos equivalentes (utilizando convenção de motor) são:

$$\begin{aligned}v_{sq} &= R_s i_{sq} + \omega \psi_{sd} + \dot{\psi}_{sq} \\v_{sd} &= R_s i_{sd} - \omega \psi_{sq} + \dot{\psi}_{sd} \\v_{rq} &= R_r i_{rq} + (\omega - \omega_r) \psi_{rd} + \dot{\psi}_{rq} \\v_{rd} &= R_r i_{rd} + (\omega - \omega_r) \psi_{rq} + \dot{\psi}_{rd}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\psi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \\ \psi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd}\end{aligned}$$

onde

$$\begin{aligned}L_s &= L_{ls} + L_m \\ L_r &= L_{lr} + L_m\end{aligned}$$

## Equação do Torque Eletromagnético

- Em coordenadas  $d$ - $q$ , o torque eletromagnético da máquina de indução é dado por

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq})$$

onde  $p$  é o número de polos da máquina.

- Observa-se da equação que, atuando sobre as correntes  $i_{rd}$  e  $i_{rq}$  do rotor, é possível controlar o torque eletromagnético no eixo da máquina;
- Observação:* nas equações acima, todas as quantidades rotóricas são referidas ao lado do estator. Para isso, é utilizada a relação de espiras estator-rotor, que é dada por

$$\frac{n_s}{n_r} = \frac{V_{nom\_s}}{V_{nom\_r}}$$

onde  $v_{nom\_s}$  e  $v_{nom\_r}$  são as tensões RMS nominais de linha do estator e rotor, respectivamente.

# Equações em por unidade (I)

- Utilizando-se bases consistentes, prefere-se usualmente escrever as equações do modelo do DFIG acima em *p.u.*;
- A escolha judiciosa dos valores-base permite também algumas simplificações nas equações, como por exemplo a eliminação dos fatores constantes na equação do torque;
- Uma definição consistente de bases de tensão, corrente, fluxo e torque pode ser encontrada em:

Vittal, V., and R. Ayyanar. "Grid integration and dynamic impact of wind energy", Kluwer, 2012, p. 16.

## Equações em por unidade (II)

As equações do modelo do DFIG expressas em *p.u.* tornam-se:

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \omega \psi_{sd} + (1/\omega_{base}) \dot{\psi}_{sq}$$

$$v_{sd} = R_s i_{sd} - \omega \psi_{sq} + (1/\omega_{base}) \dot{\psi}_{sd}$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + (\omega - \omega_r) \psi_{rd} + (1/\omega_{base}) \dot{\psi}_{rq}$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + (\omega - \omega_r) \psi_{rq} + (1/\omega_{base}) \dot{\psi}_{rd}$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq}$$

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd}$$

$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq}$$

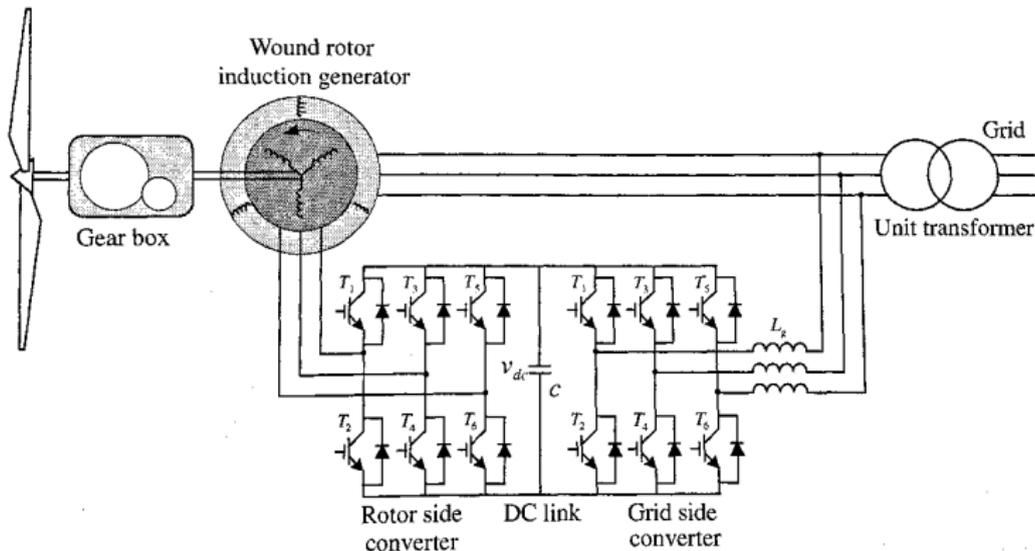
$$\psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd}$$

$$T_e = L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq})$$

Obs. - Todas as unidades em *p.u.*, exceto  $\omega_{base}$ .

# Conversores eletrônicos do DFIG (I)

- Configuração *back-to-back*, com dois conversores fonte-de-tensão trifásicos compartilhando ligação C.C. comum



## Conversores eletrônicos do DFIG (II)

- **Conversor pelo lado do rotor (RSC):** injeta correntes controladas, de frequência variável, no rotor do DFIG, através de escovas e anéis deslizantes;
- **Conversor pelo lado da rede (GSC):**
  - estabelece interface com a rede;
  - dá suporte à troca de energia entre rotor e rede;
  - fornece suporte de potência reativa.

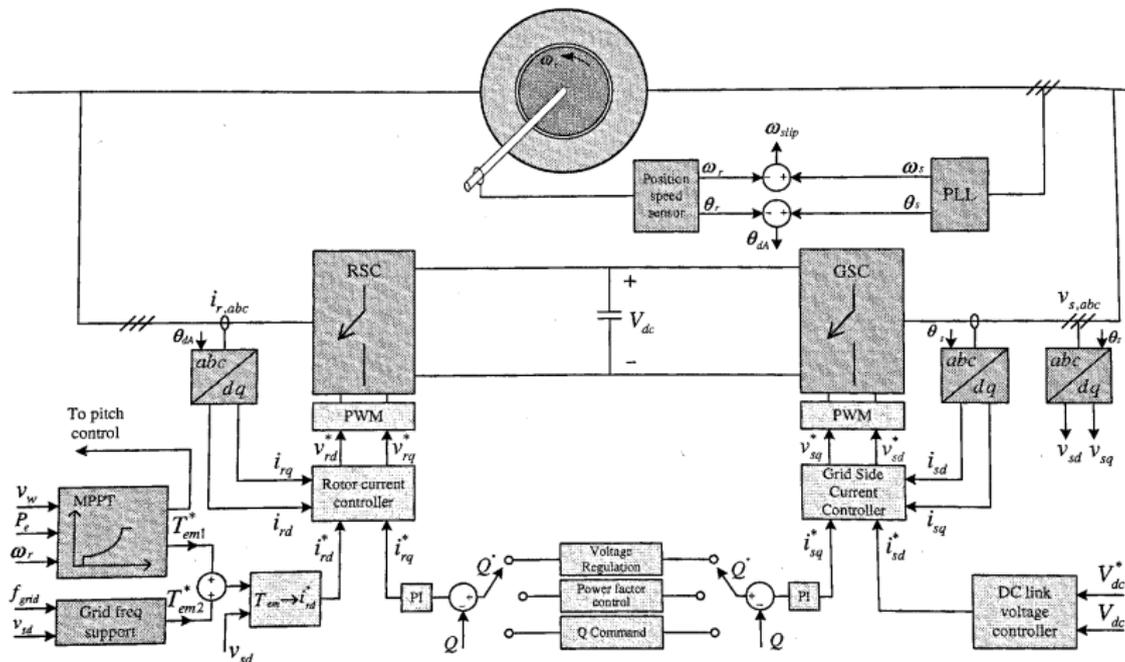
# Funções de Controle do RSC

- O RSC controla os fluxos de potência ativa e reativa do DFIG para a rede;
- Isto é realizado via controle de magnitude, frequência e ângulo de fase das correntes trifásicas injetadas no rotor mediante o PWM do RSC;
- Objetivos do controle do RSC:
  - **Máxima extração de potência**, mediante o controle de torque/potência elétricos;
  - Controle de potência reativa (desacoplado do contr. de pot. ativa), para regulação da tensão nos terminais do DFIG;
  - Pode também ser usado para dar suporte à manutenção de frequência durante grandes perturbações via controle de potência ativa (emulação de inércia).

# Funções de Controle do GSC

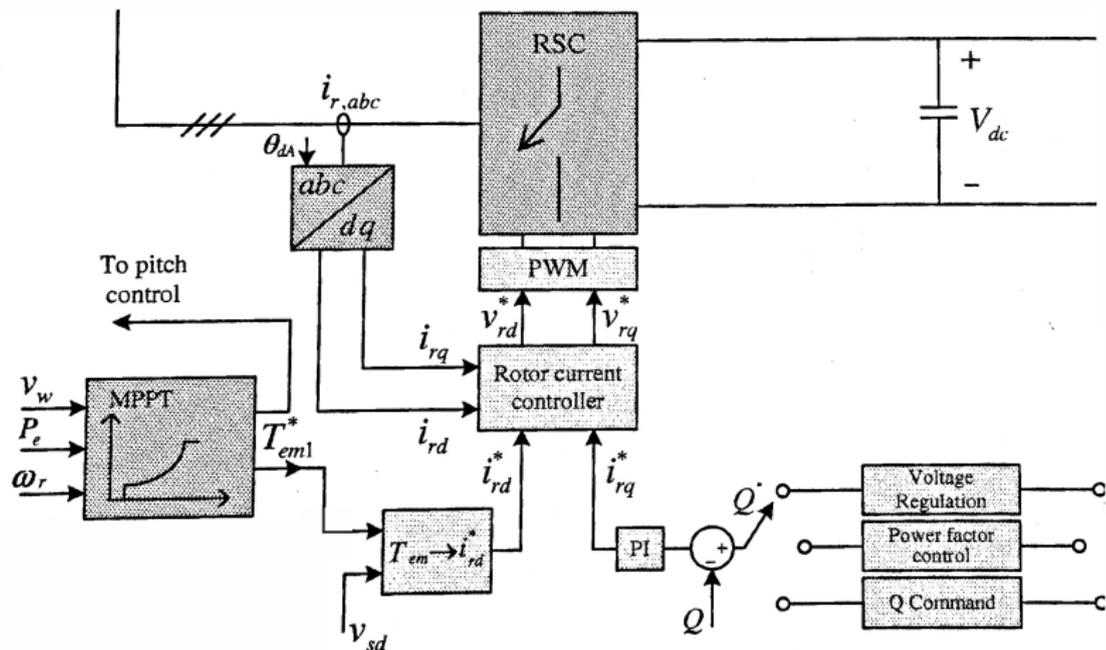
- O GSC sintetiza, na frequência da rede, tensões trifásicas cujas magnitudes e fases são controladas;
- Objetivos do controle do GSC:
  - Regular a tensão do link DC, fornecendo um caminho para a transferência de potência ativa entre o RSC e a rede;
  - Fornecer suporte reativo adicional à rede similar a de um STATCOM, porém dentro dos limites de sua potência nominal em MVA (consideravelmente menor do que a do DFIG).

# Visão geral do controle de um DFIG



# Controle do RSC

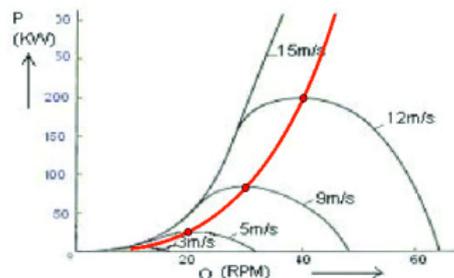
- Torque control for MPPT; ref.  $T_{em}^*$  obtained to control  $\omega_r$ .



# Geração das referências de torque/potência ativa

- **Objetivo:** extrair máxima potência do vento quando a turbina opera na faixa permissível (abaixo da potência nominal).

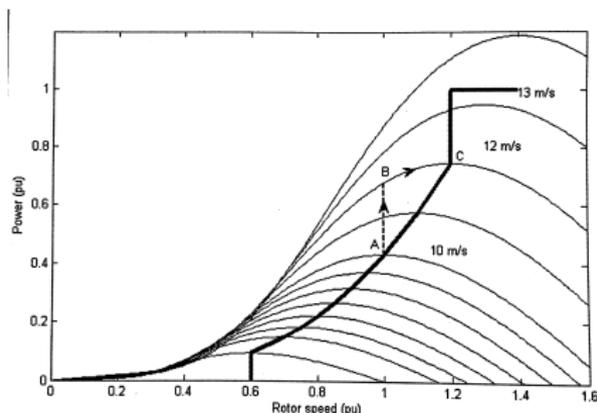
- **MPPT:** para uma dada velocidade do vento, potência máxima e veloc. do rotor são fixadas:



- Há **mais do que uma forma** de implementar o MPPT via controle de torque/potência elétrica.

## Método 1: Ref. de potência função da veloc. do rotor

- O comando de torque é obtido como função da velocidade do rotor;
- Operação inicial em **A**, com  $v = 10 \text{ m/s}$ .
- $v$  aumenta para  $12 \text{ m/s}$  :  
 $P_W$  aumenta, mas  $P_e$  não varia instantaneamente (Pto. **B**);
- Rotor acelera e  $\omega_r$  aumenta, gerando comando para aumentar  $P_e$ ;
- Pto. oper. move-se para **C**, ao longo da curva de  $v = 12 \text{ m/s}$ .



## Método 2: Ref. de veloc. função da potência

- A figura abaixo ilustra esta estratégia:

