



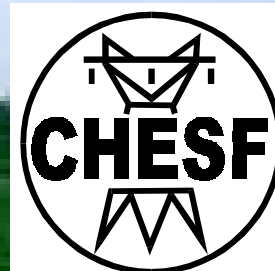
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Eletricistas e  
Eletrônicos

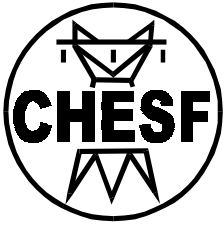
"Networking  
the World"™

IEEE Seção Bahia  
Capítulo Conjunto  
PES/IAS/PELS  
Nordeste 1

# *“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração Eólica com Máquina de Indução”*

Apoio :





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

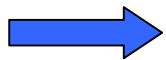
## MOTIVAÇÕES PARA A PESQUISA



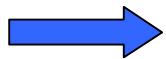
PERFIL BRASILEIRO



DISSEMINAÇÃO MUNDIAL



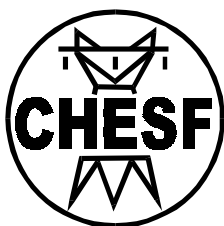
INCENTIVOS À TECNOLOGIA



APROVAÇÕES ANEEL



USO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

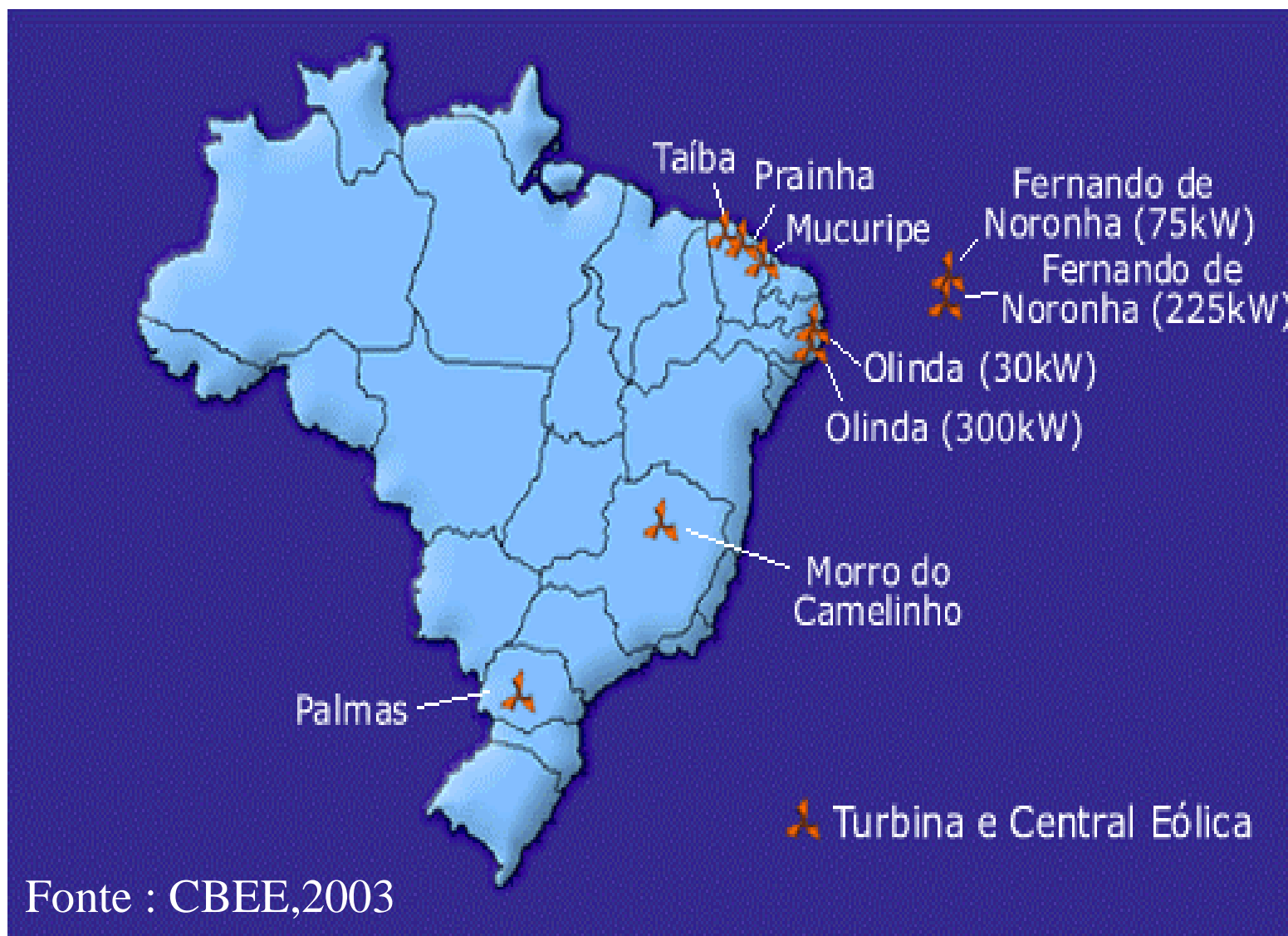


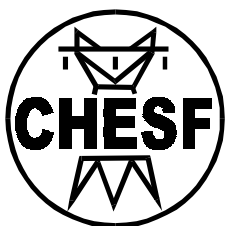
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™



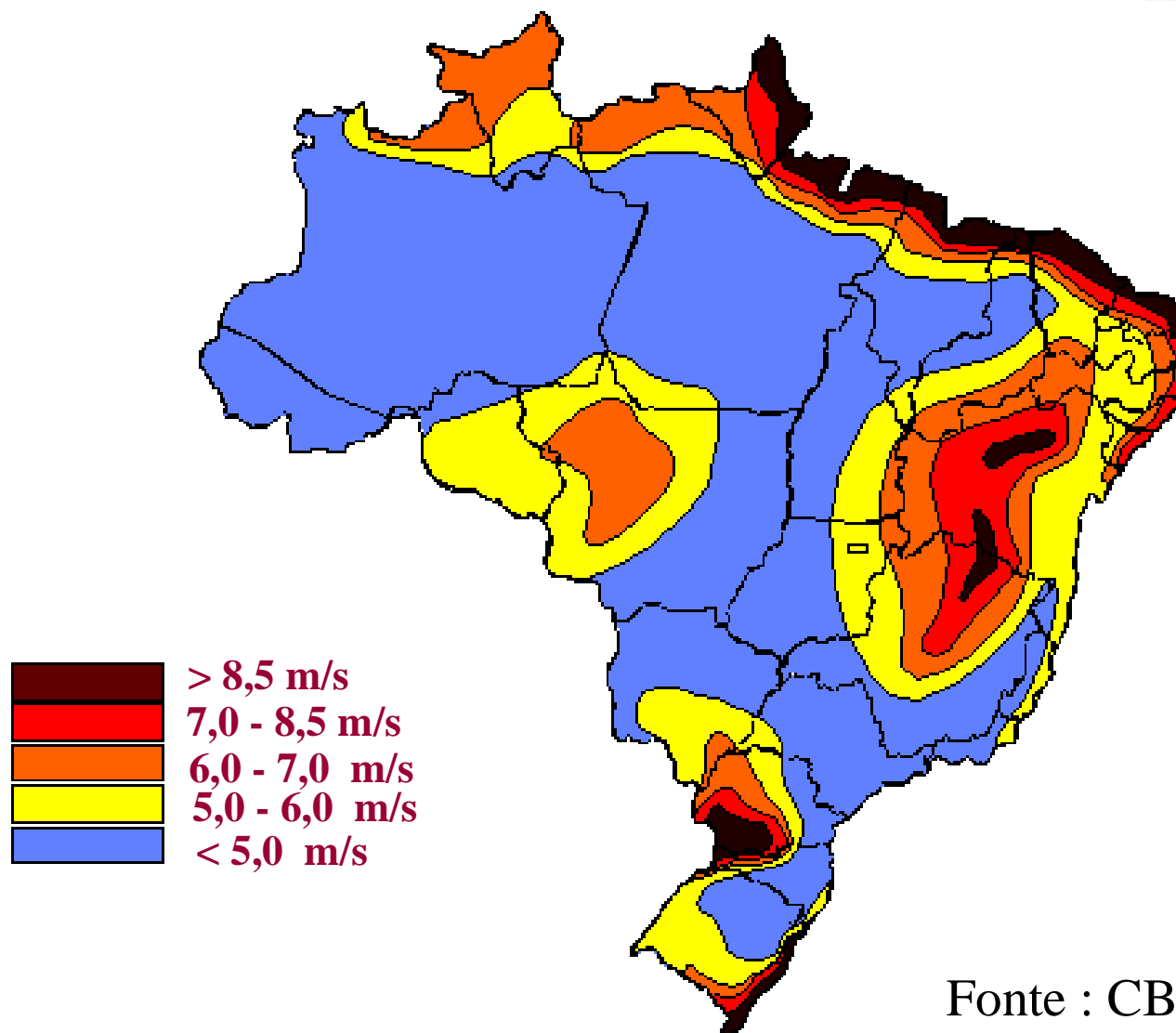


*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

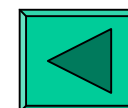


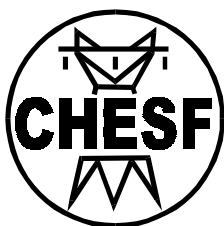
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Eletricitistas e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™



Fonte : CBEE,2003





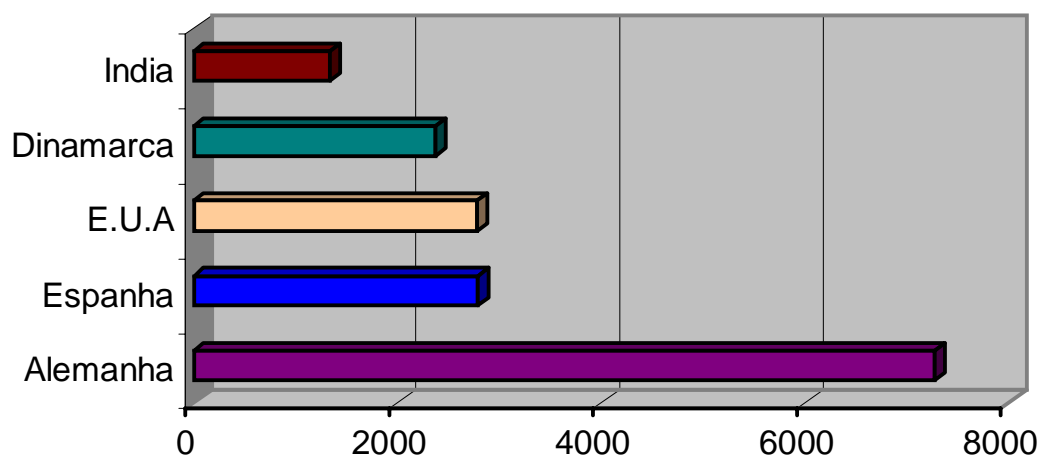
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

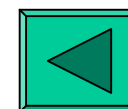
## Principais países no uso de Energia Eólica

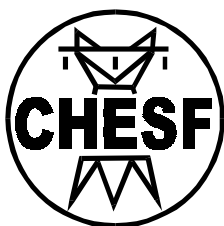


## Megawatts Instalados

País	MW. Instalado
Alemanha	7,270.00
Espanha	2,789.00
E.U.A.	2,782.00
Dinamarca	2,374.00
Índia	1,340.00

**Ranking dos principais países usuários de Turbinas Eólicas segundo os  
Megawatts instalados**





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



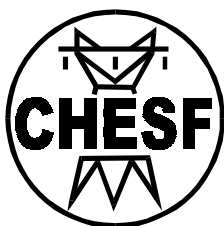
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

Na **União Européia**, 12% de toda energia comprada pelas empresas de distribuição devem ser por lei provenientes de fontes renováveis(CBEE,2002);

O **Brasil**, com a aprovação em nov/2003, já pode contar com o Programa de Incentivo a Fontes de Energia (Proinfa), que prevê a adição de pelo menos 1,1 mil megawatts de energia eólica até 2006.





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

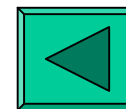


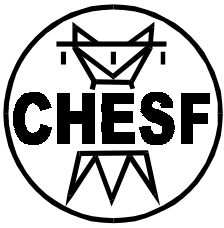
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

1998		1999		2001		2002		2003	
Potência(MW)	Nº	Potência(MW)	Nº	Potência(MW)	Nº	Potência(MW)	Nº	Potência(MW)	Nº
15,00	1	2,50	38	3.337,65	46	2.784,40	12	800,80	

**Quadro Resumo de Autorizações ANEEL para instalação de Turbinas  
Eólicas no Brasil (ANEEL, Fev/2003)**



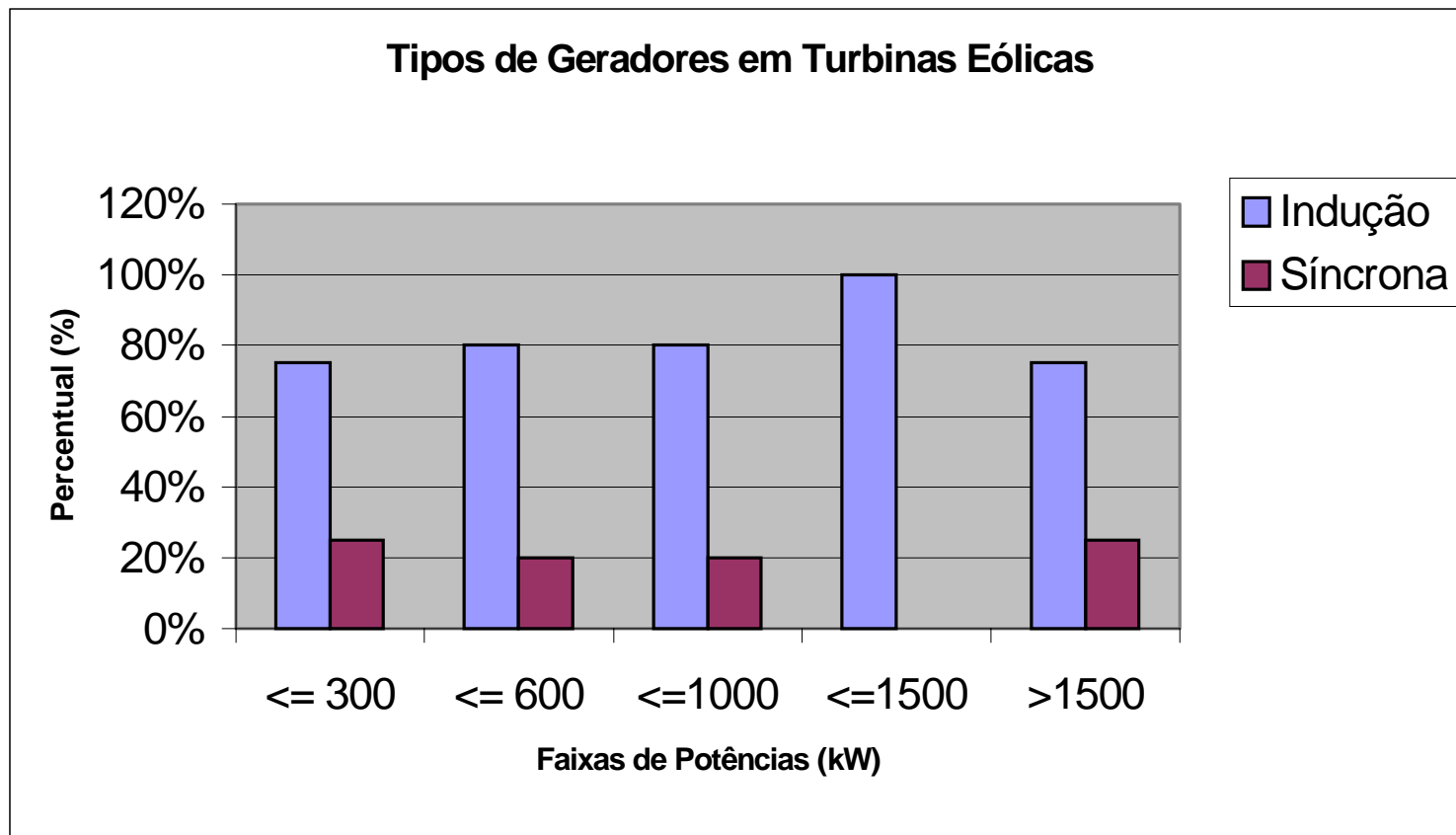


*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

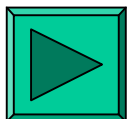


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

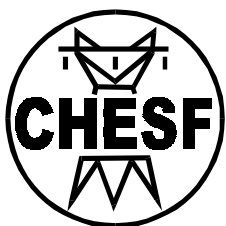
“Networking  
the World”™



**Tipos de geradores utilizados em Turbinas Eólicas  
em diferentes faixas de Potência**



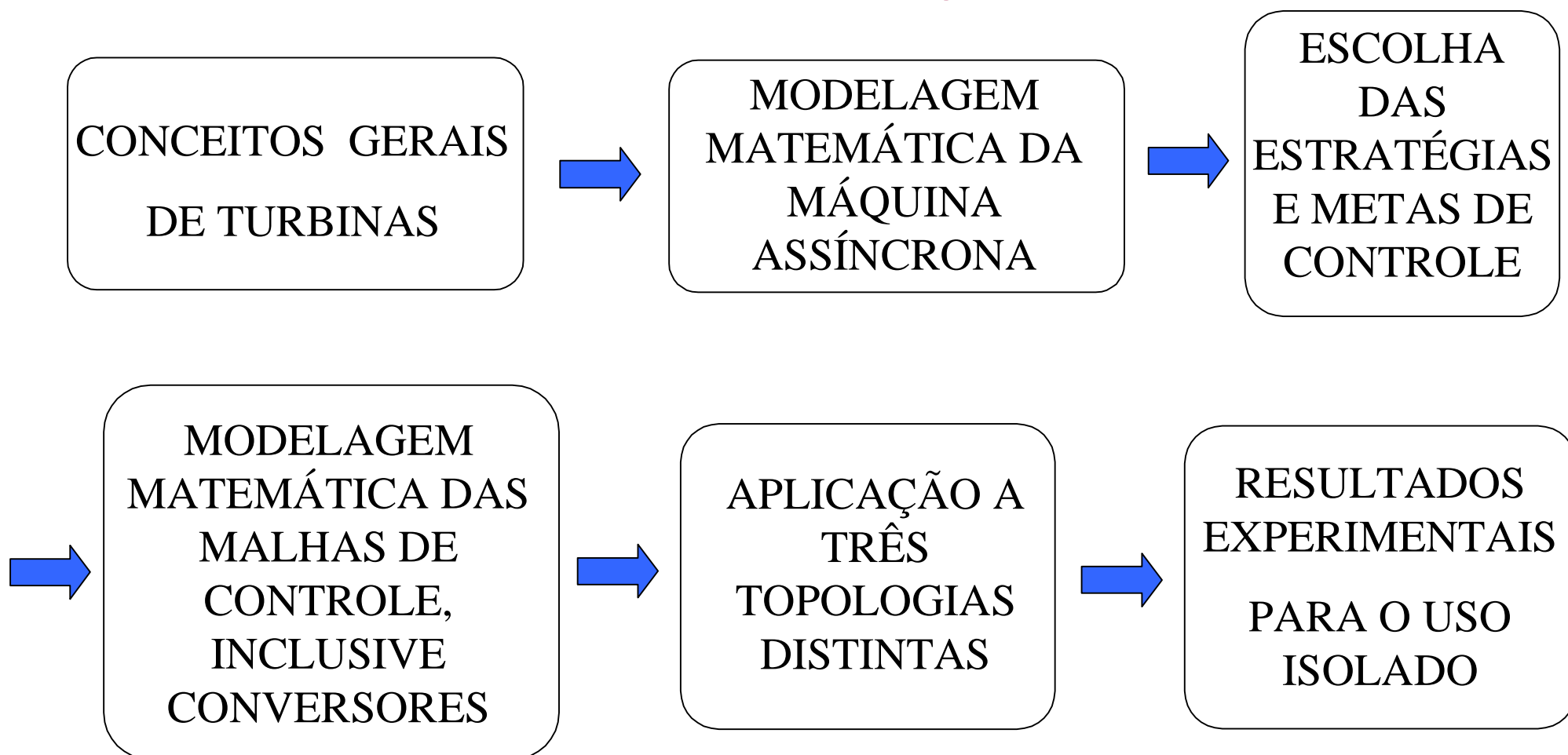


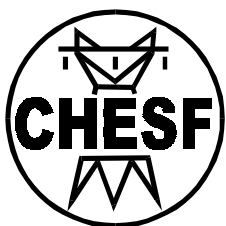


*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



## ETAPAS DA PESQUISA





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

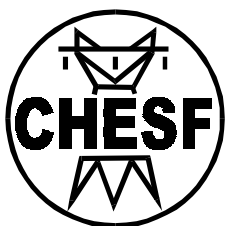


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

## **OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES PRETENDIDAS**

- Implementação e avaliação sobre as técnicas de controle no acionamento de um gerador assíncrono acionado por turbinas eólicas;
- Desenvolvimento de algoritmo para estudo de três possibilidades de geração : gerador isolado; gerador conectado à rede elétrica, sendo a máquina de indução com rotor tipo gaiola; e gerador conectado à rede, com rotor bobinado;
- Implementação de três estratégias de controle vetorial de máquinas de indução aplicadas ao controle de potências ativa e reativa geradas, em nível de simulação;
- Realização de montagem e programação com controle digital para ensaios no gerador isolado;
- Disponibilização dos algoritmos para estudo de impacto de conexão de turbinas eólicas na rede elétrica.



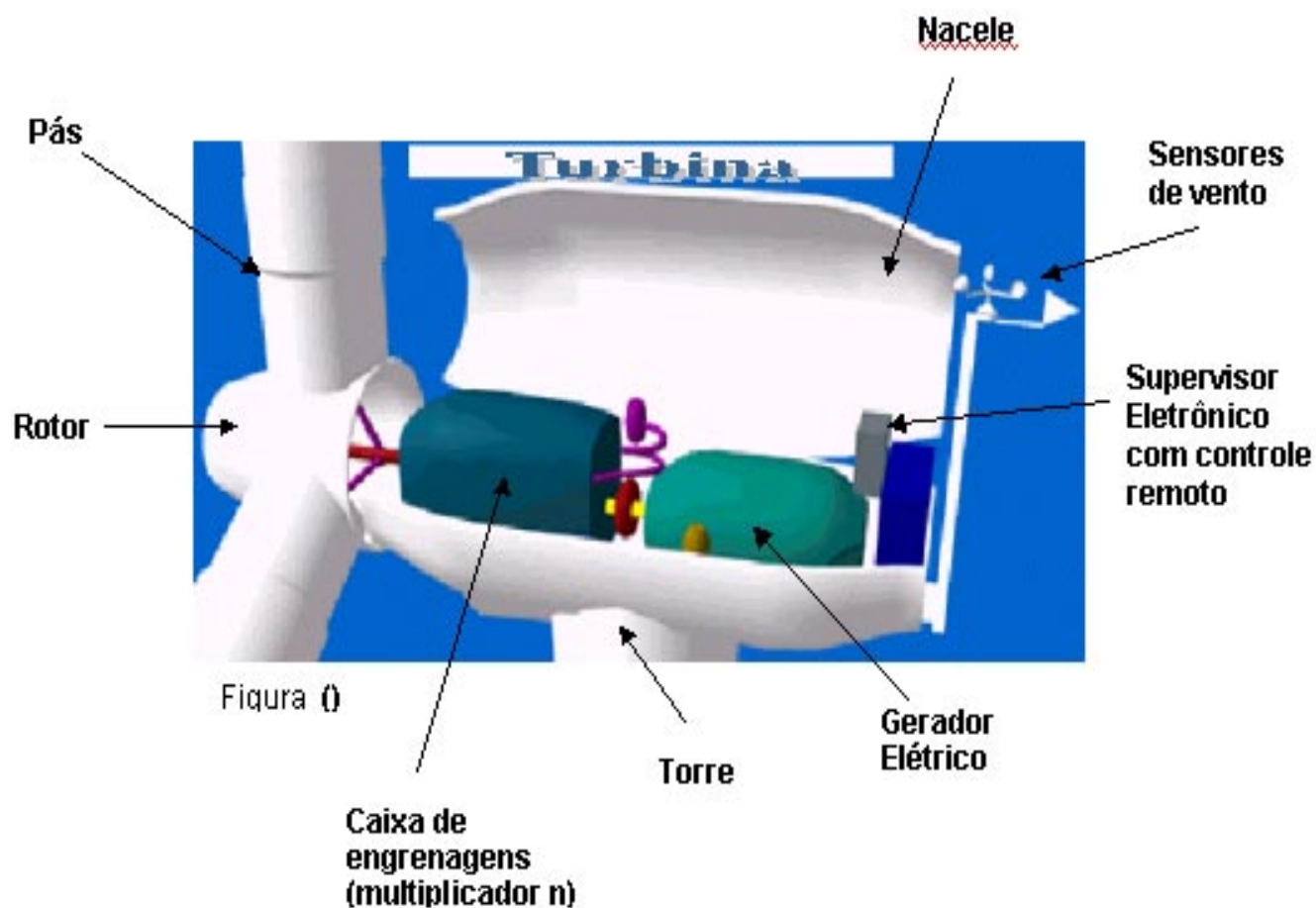
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração Eólica com Máquina de Indução”*

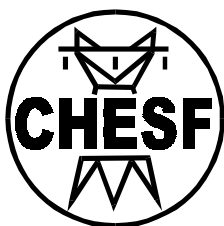


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

**Tecnologia Atual :**



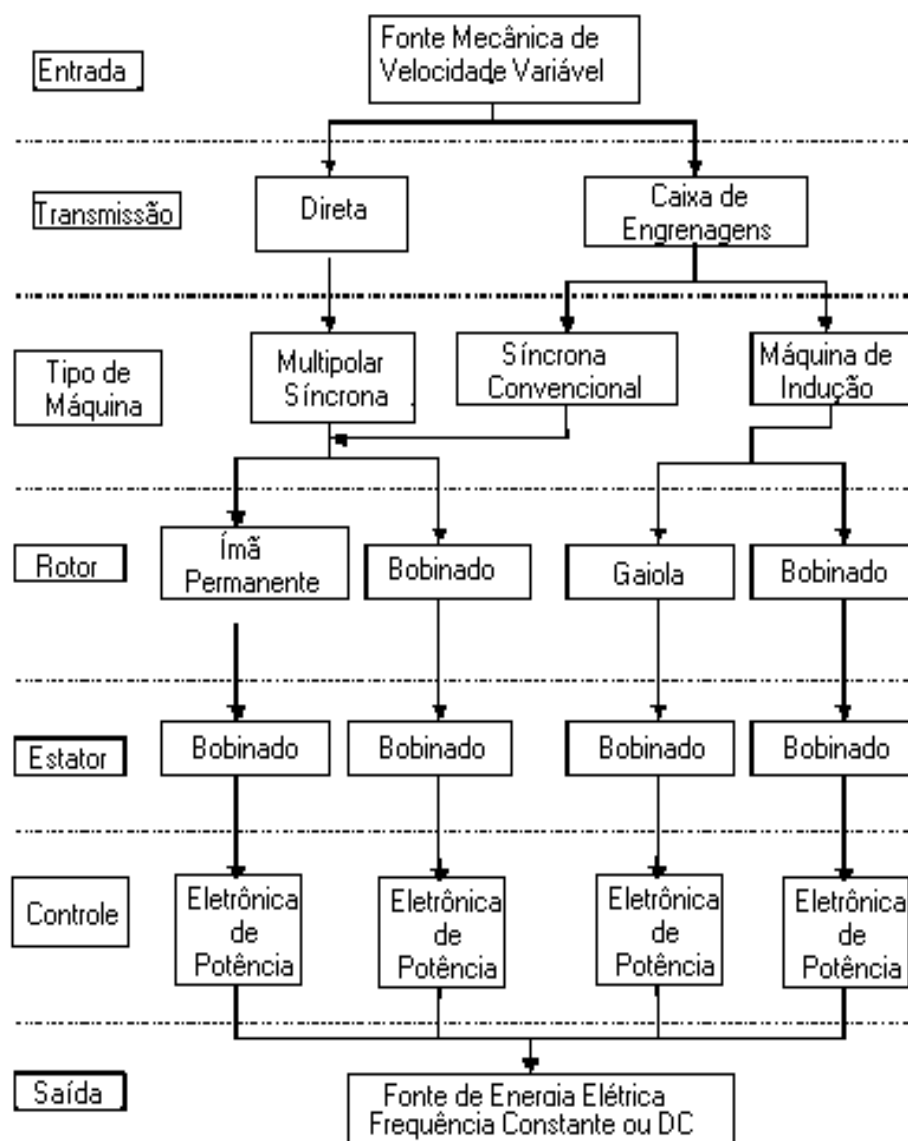


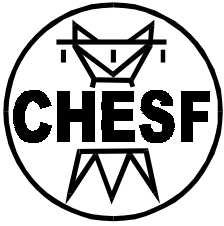
## *“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração Eólica com Máquina de Indução”*



IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Eletricistas e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™





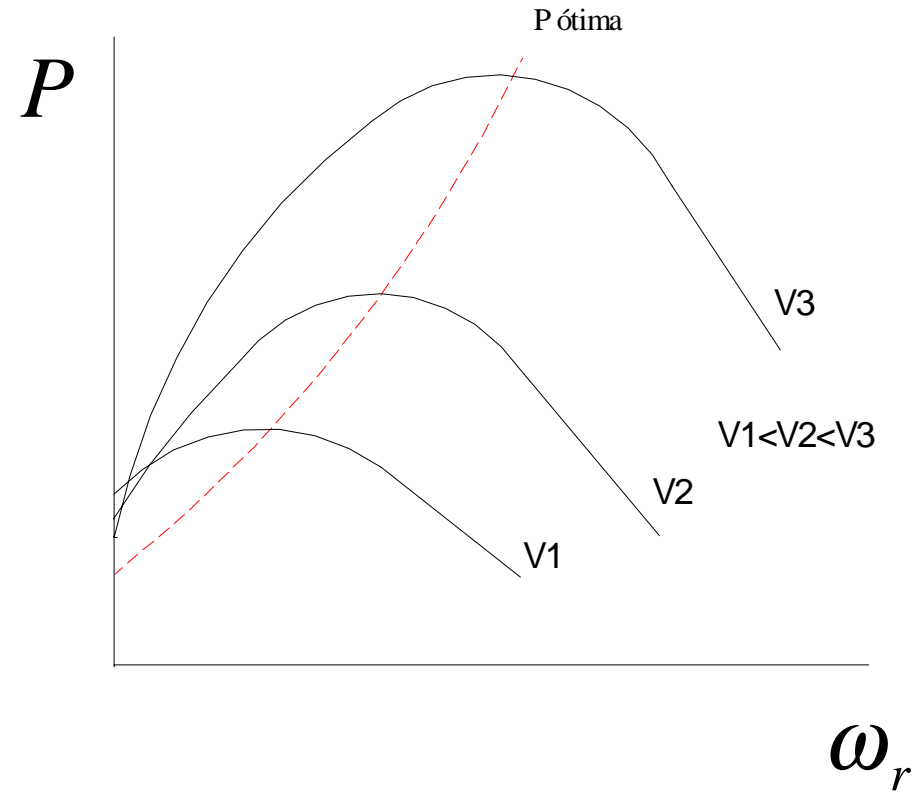
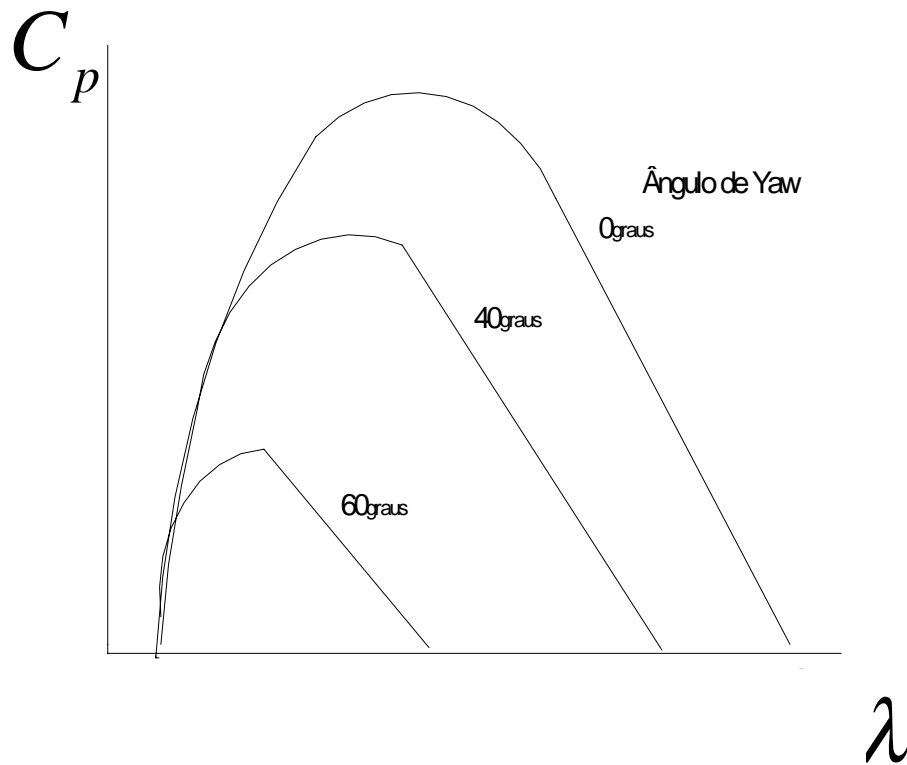
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

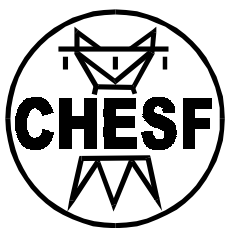


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Eletricitistas e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

**Curvas Típicas :**





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

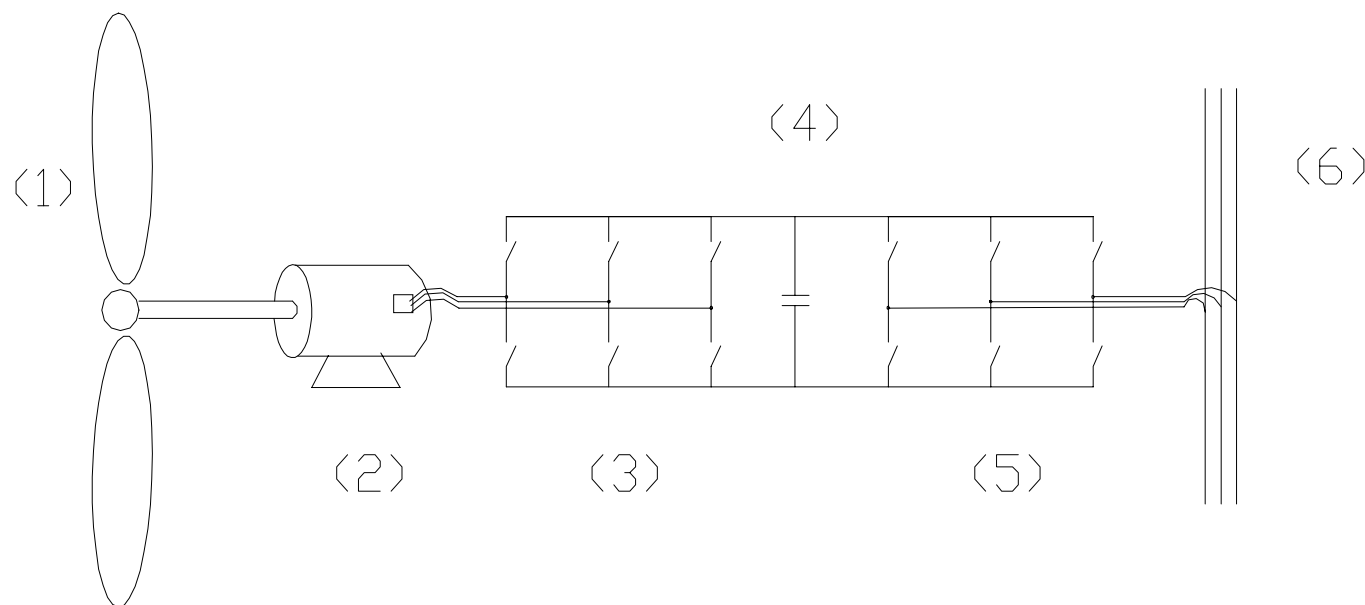


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Eletricistas e  
Eletrônicos

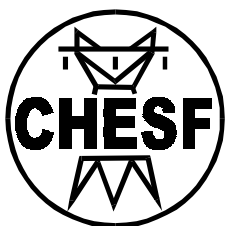
“Networking  
the World”™

**Topologias Estudadas :**

**Caso 1 : Gerador de Indução com Rotor Gaiola Ligado à Rede**



- (1)Turbina
- (2)Gerador de Indução
- (3)Conversor a PWM
- (4)Capacitor
- (5)Conversor a PWM
- (6) Barramento Infinito



*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

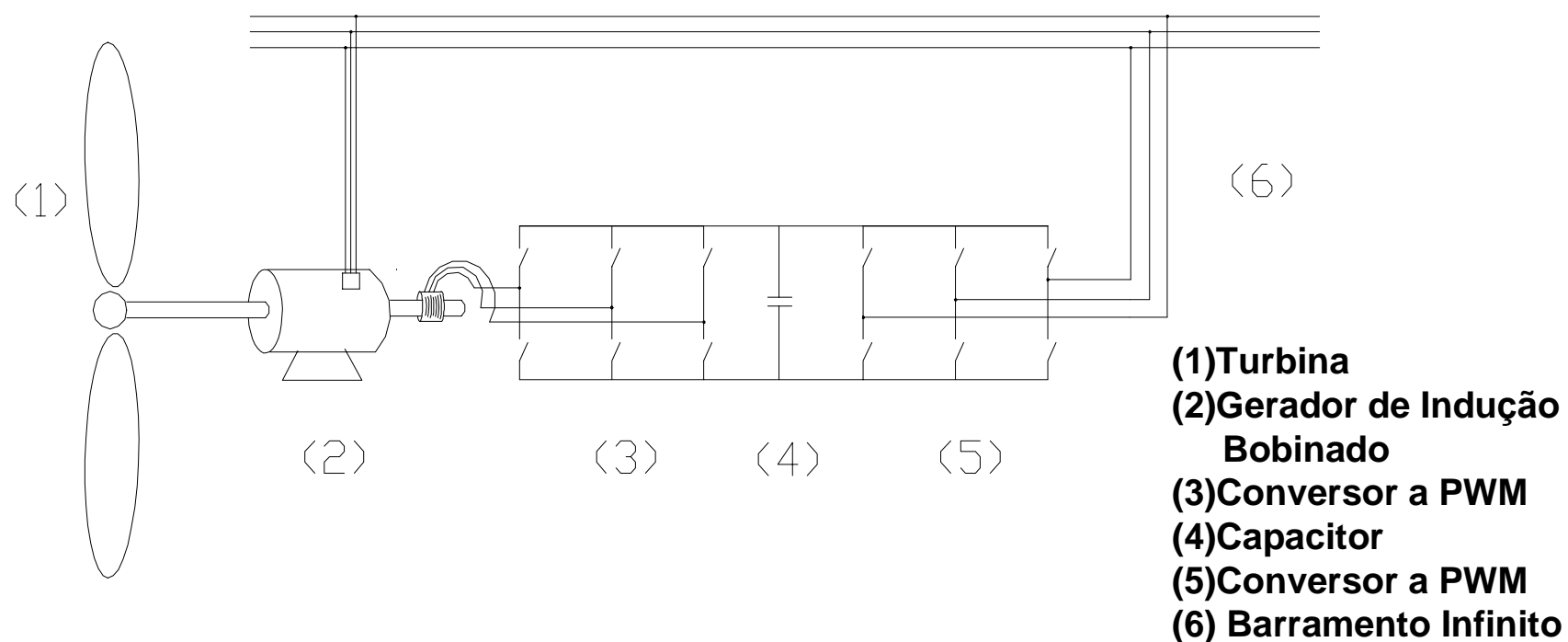


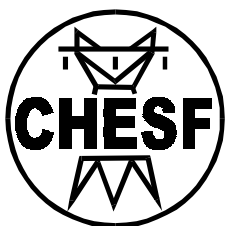
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

## **Topologias Estudadas :**

### **Caso 2 : Gerador de Indução com Rotor Bobinado Ligado à Rede**





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

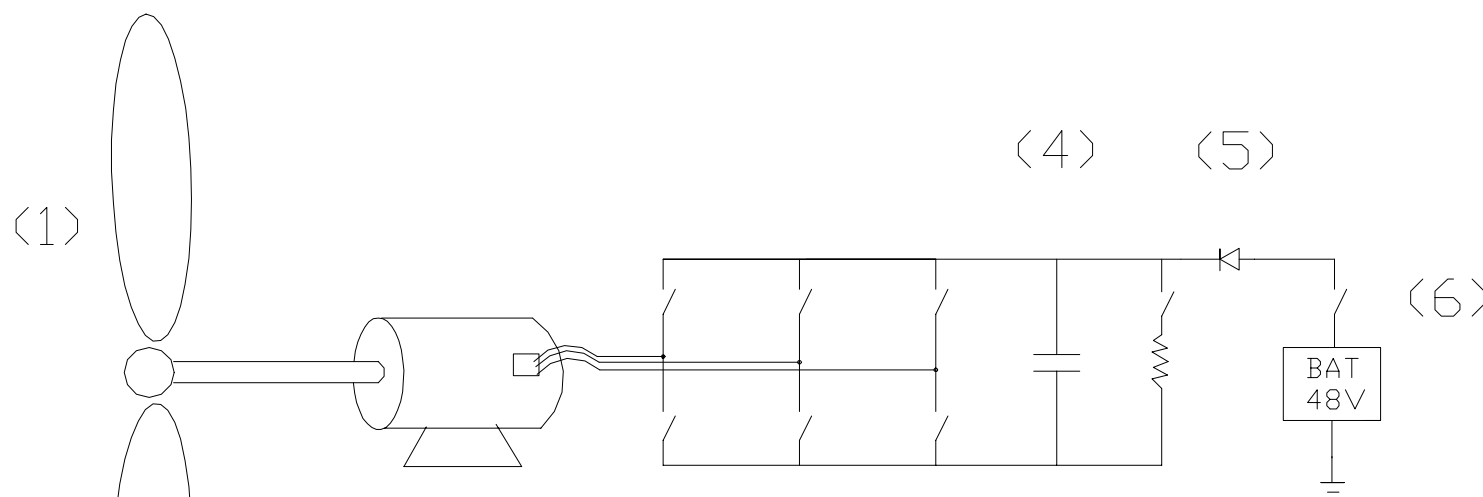


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Eletricistas e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

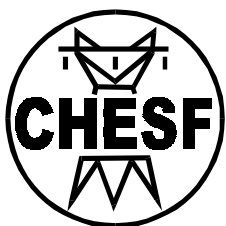
**Topologias Estudadas :**

**Caso 3 : Gerador de Indução com Rotor Gaiola Isolado**



- (1) Turbina
- (2) Gerador de Indução
- (3) Conversor a PWM
- (4) Capacitor
- (5) Diodo
- (6) Bateria





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

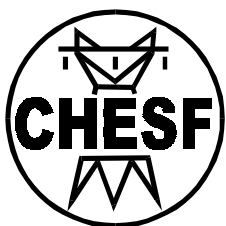


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

## ***Modelagem e Considerações :***

- Modelagem Matemática da Máquina segundo o modelo fasorial “DQ”;
- Conversores controlados por PWM, Técnica do Regulador Trifásico Simétrico;
- Frequência de chaveamento e amostragem de 5 kHz;
- Escolha da técnica de controle dos conversores mais favorável;
- Estimação de Fluxo pelo Modelo em Corrente;
- Velocidade ou conjugado primário imposto como fonte primária;
- Potência ativa extraída da Curva Ótima de Conjugado x Velocidade do Eixo;
- Controle de fator de potência;



*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

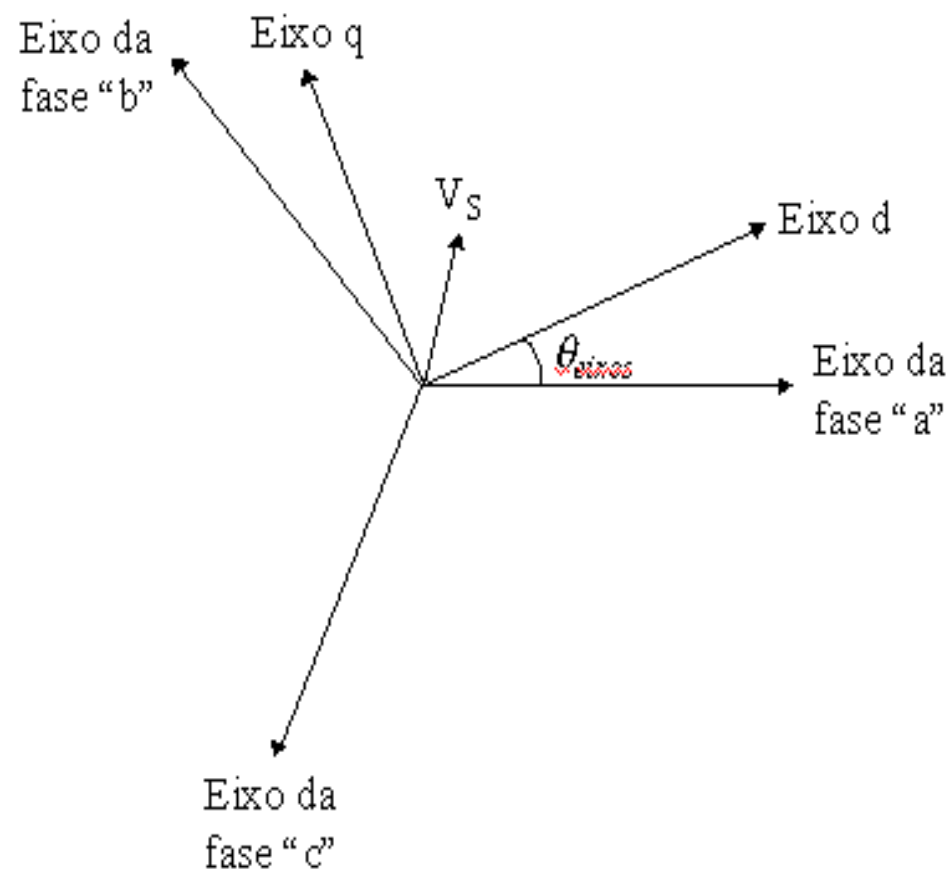
**Modelagem DQ0 :**

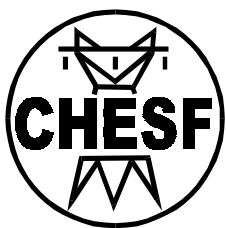
$$\vec{v}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d\vec{\lambda}_s}{dt} + j\omega_{eixos} \vec{\lambda}_s$$

$$\vec{v}_r = R_r \cdot \vec{i}_r + \frac{d\vec{\lambda}_r}{dt} + j(\omega_{eixos} - \omega_r) \vec{\lambda}_r$$

$$\vec{\lambda}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r$$

$$\vec{\lambda}_r = L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s$$



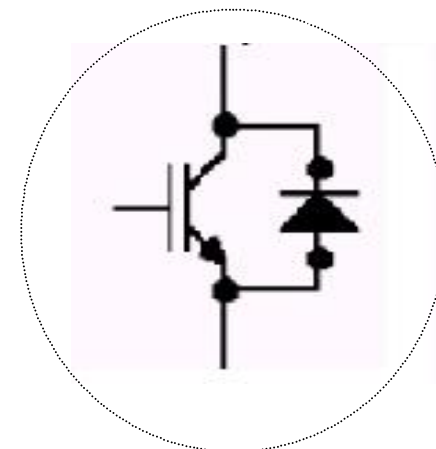
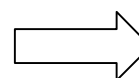
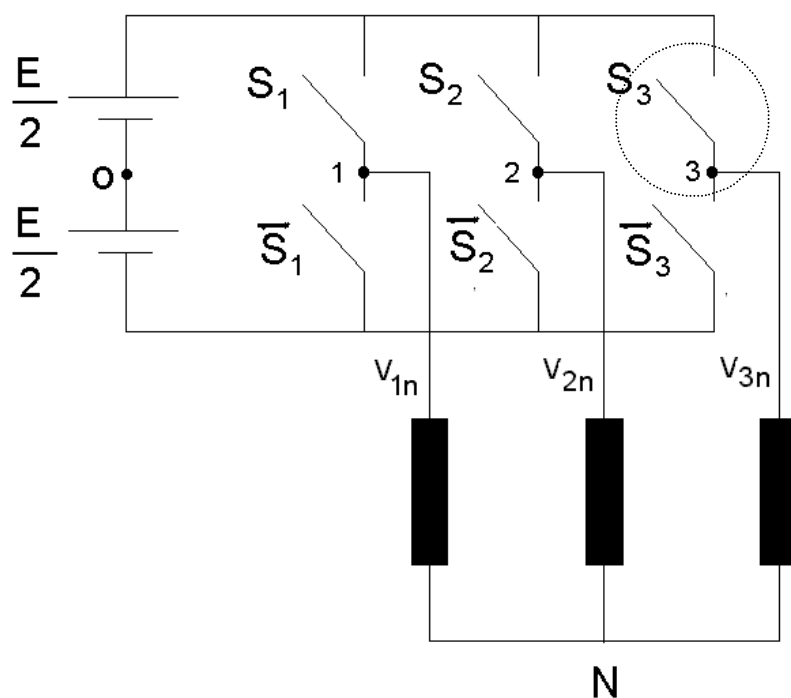


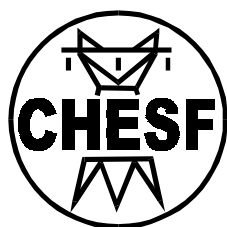
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



## PRINCÍPIO DO CONTROLE DOS CONVERSORES

CONTROLE  $\rightarrow$  REFERÊNCIAS  $\xrightarrow{\text{PWM}}$  CONVERSOR





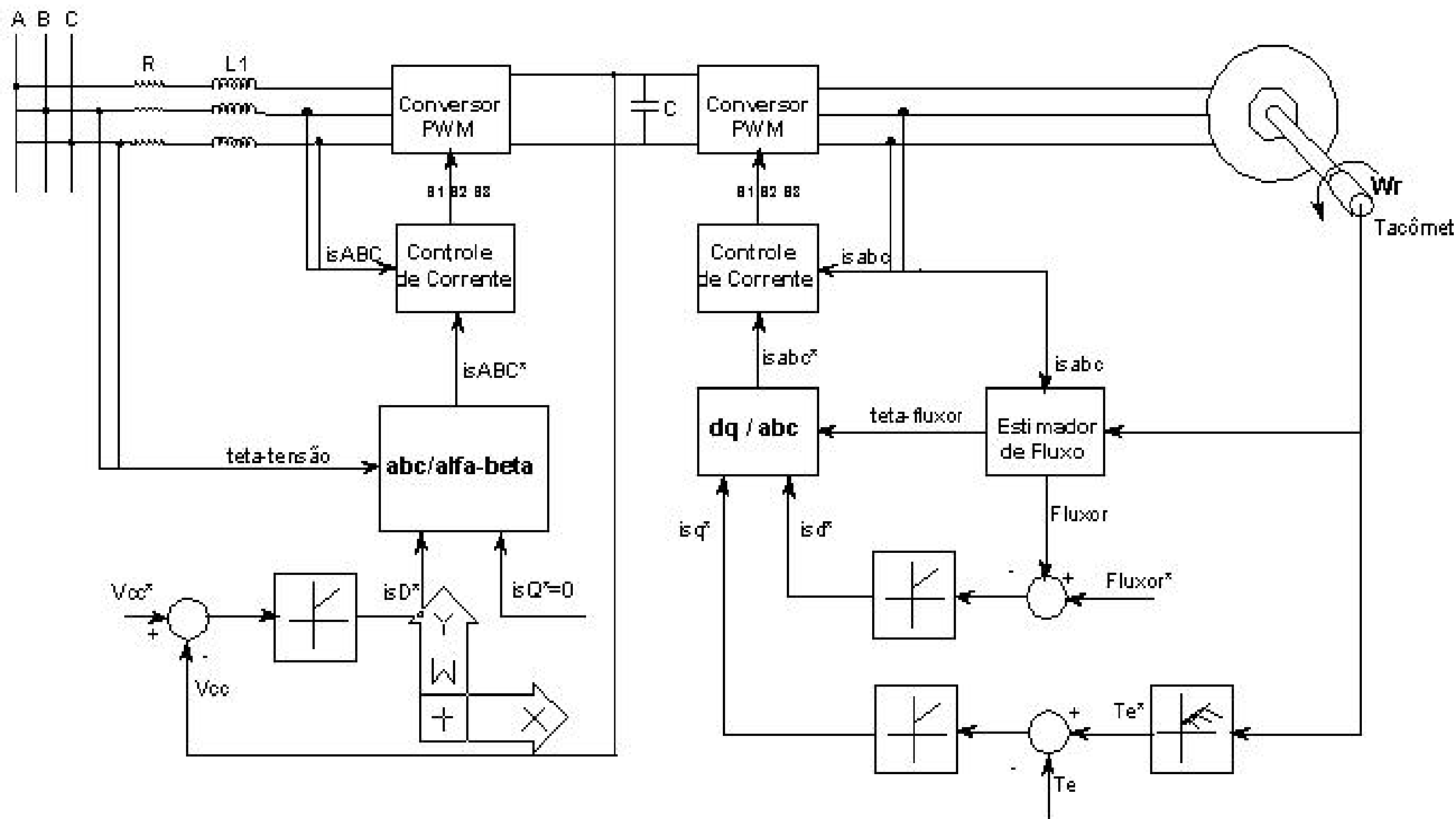
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

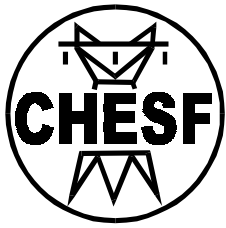


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

## Caso 1 : Gerador de Indução com Rotor Gaiola Ligado à Rede





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

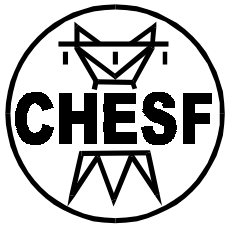


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Eletricistas e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

***Modelagem e Considerações :***

- Controle do Inversor por orientação pelo Fluxo de Rotor e do Retificador pela Tensão da Rede;
- Estimação de Fluxo pelo Modelo em Corrente;
- Malhas de Controle
  - Lado do conversor ligado à rede:  $V_{cc}$ ,  $\cos\phi$  e correntes
  - Lado do conversor ligado à MI: fluxo,  $T_e$  e correntes;
- Conjugado primário imposto,  $T_e$  extraído da Curva Ótima de Conjugado x Velocidade da Turbina;
- Fator de potência unitário;
- $P$  controlada de modo a obter máximo aproveitamento da turbina
- $Q$  mantida nula



*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



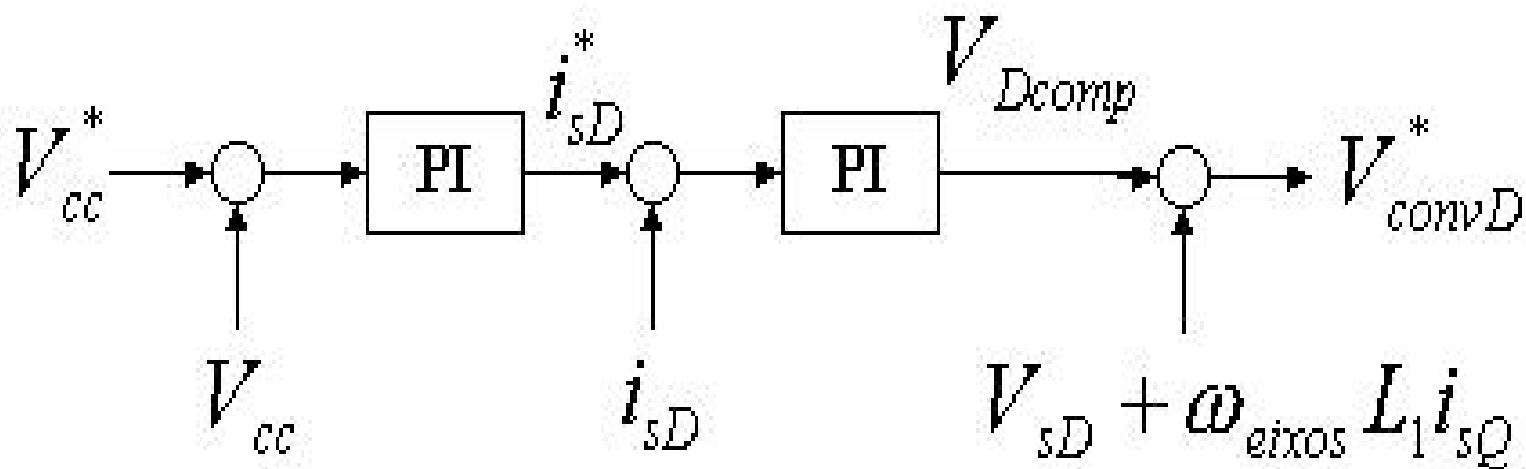
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

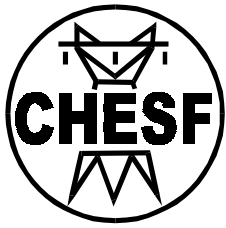
“Networking  
the World”™

Para o controle da **tensão do barramento CC**, deve-se procurar impor valores adequados à corrente do capacitor. Sendo :  $V_{cc} i_{conv} = P_{gerada}$

Como :  $P = \frac{3}{2} (v_{sD} i_{sD} + v_{sQ} i_{sQ})$  , fazendo  $v_{sQ} = 0$  , teremos:

$$\frac{di_{sD}}{dt} = -\frac{R}{L} i_{sD} + \frac{1}{L} V_{DComp} \quad , \text{ onde: } V_{DComp} = V_{sD} + \omega_{eixos} L_l i_{sQ} - V_{convD}$$





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



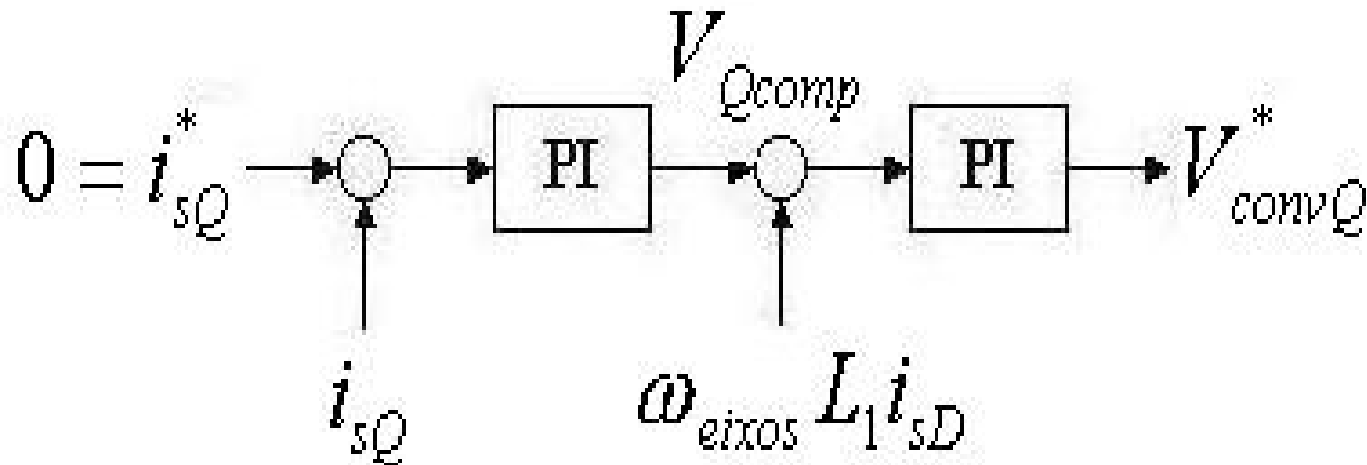
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

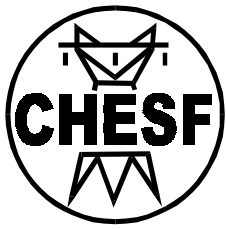
“Networking  
the World”™

O fator de potência será mantido unitário com o controle de potência reativa em zero.

Como :  $Q = \frac{3}{2}(v_{sQ}i_{sD} - v_{sD}i_{sQ})$  e fazendo :  $v_{sQ} = 0$  , tem-se:

$$\frac{di_{sQ}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{sQ} + \frac{1}{L}V_{QComp} \quad , \text{ onde : } V_{QComp} = -\omega_{eixos}L_l i_{sD} - V_{convQ}$$





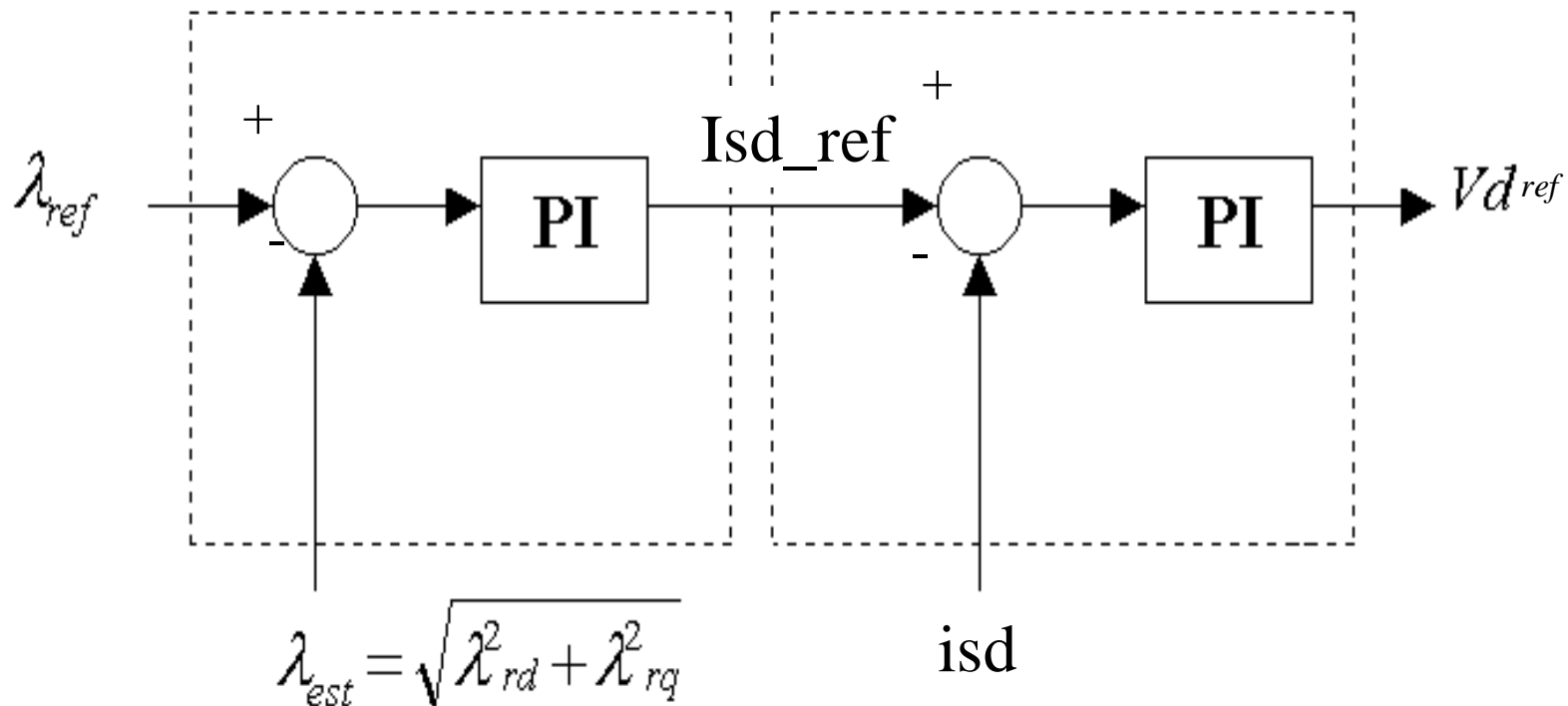
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



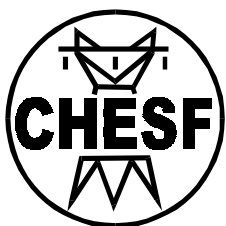
## Controle de Fluxo de Rotor

Fazendo  $\lambda_{rq} = 0$  e  $V_{rd} = 0 = R_r \left( \frac{\lambda_{rd}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{sd} \right) + \frac{d\lambda_{rd}}{dt}$  podemos escrever :

$$\frac{d\lambda_{rd}}{dt} + \frac{\lambda_{rd}}{\tau_r} = \frac{L_m}{\tau_r} i_{sd}$$







*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

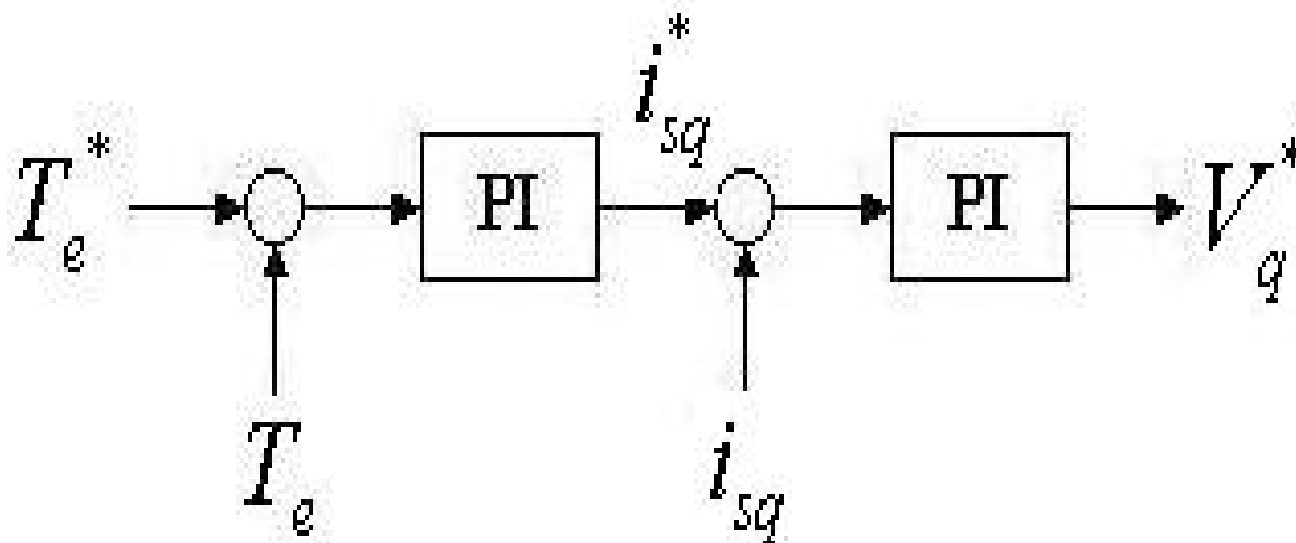


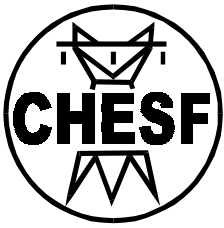
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

À máquina foi imposto um conjugado primário. Com o aumento da velocidade, procurou-se aplicar um conjugado eletromagnético de modo a obter um aproveitamento ótimo da turbina, baseado na característica  $T_e \times W_r$  da mesma. Para :  $\lambda_{rq} = 0$ , teremos :

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{rd} i_{sq}$$





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

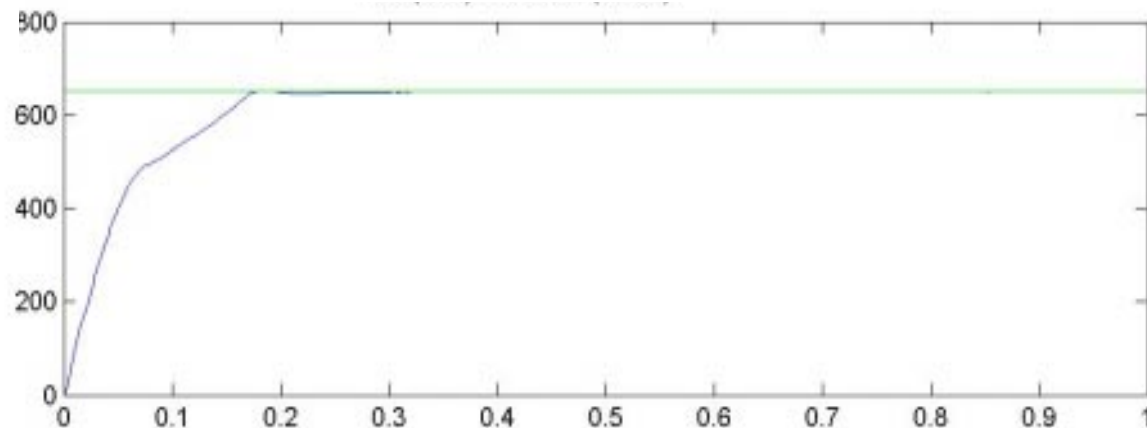


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

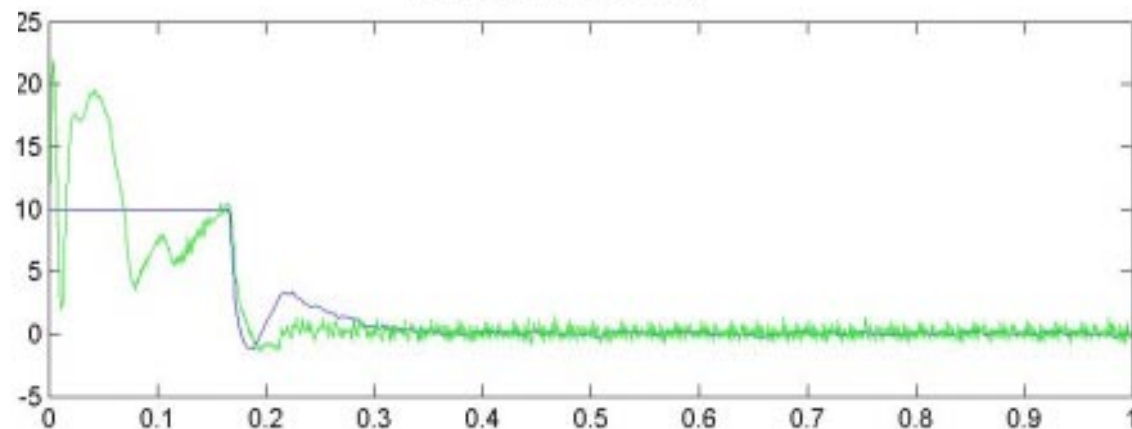
“Networking  
the World”™

**Resultados Obtidos : Controle da corrente de eixo direto e  $V_{cc}$**

$V_{cc}(V)$

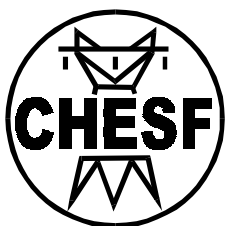


$I_{SD}(A)$



$t(s)$

$t(s)$



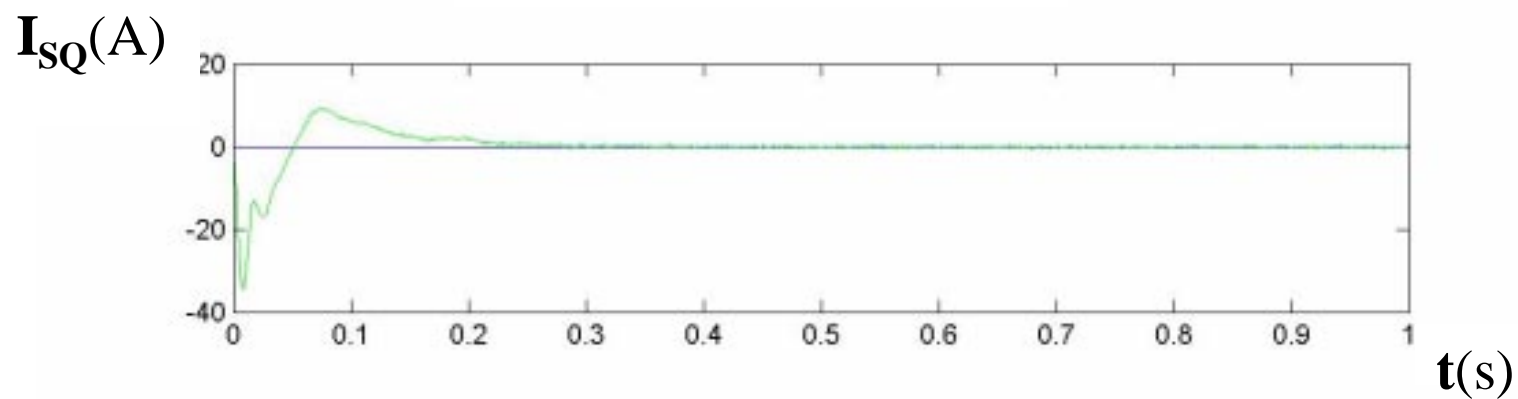
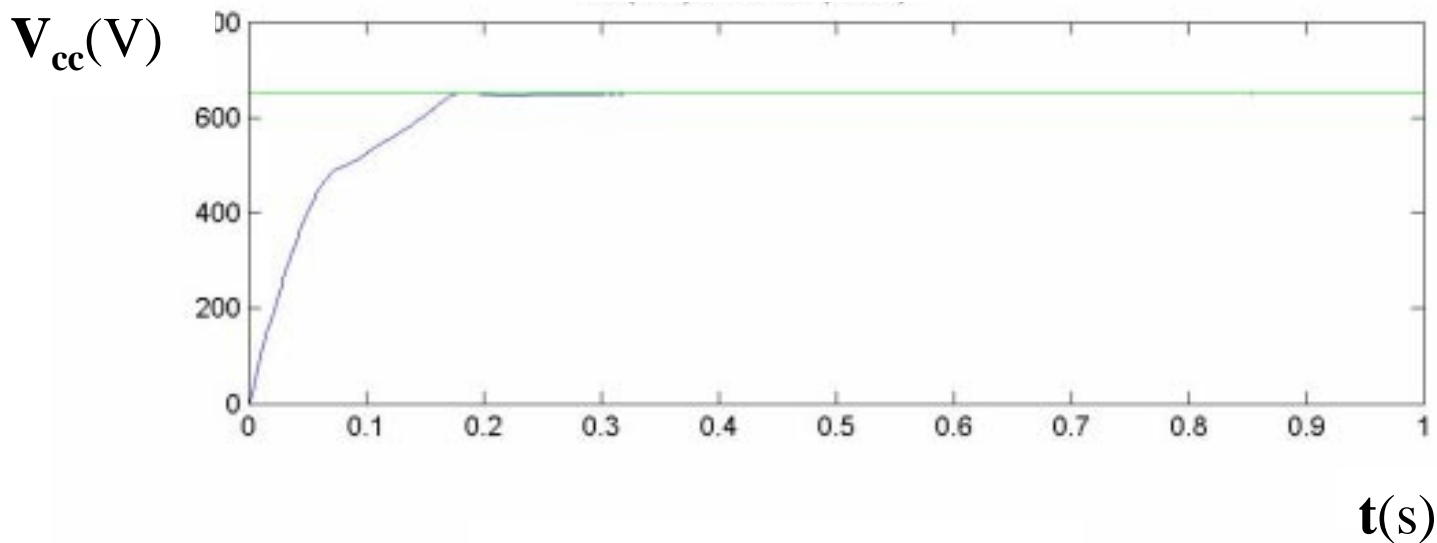
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

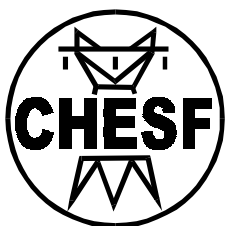


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

## Resultados Obtidos : Controle do fator de potência





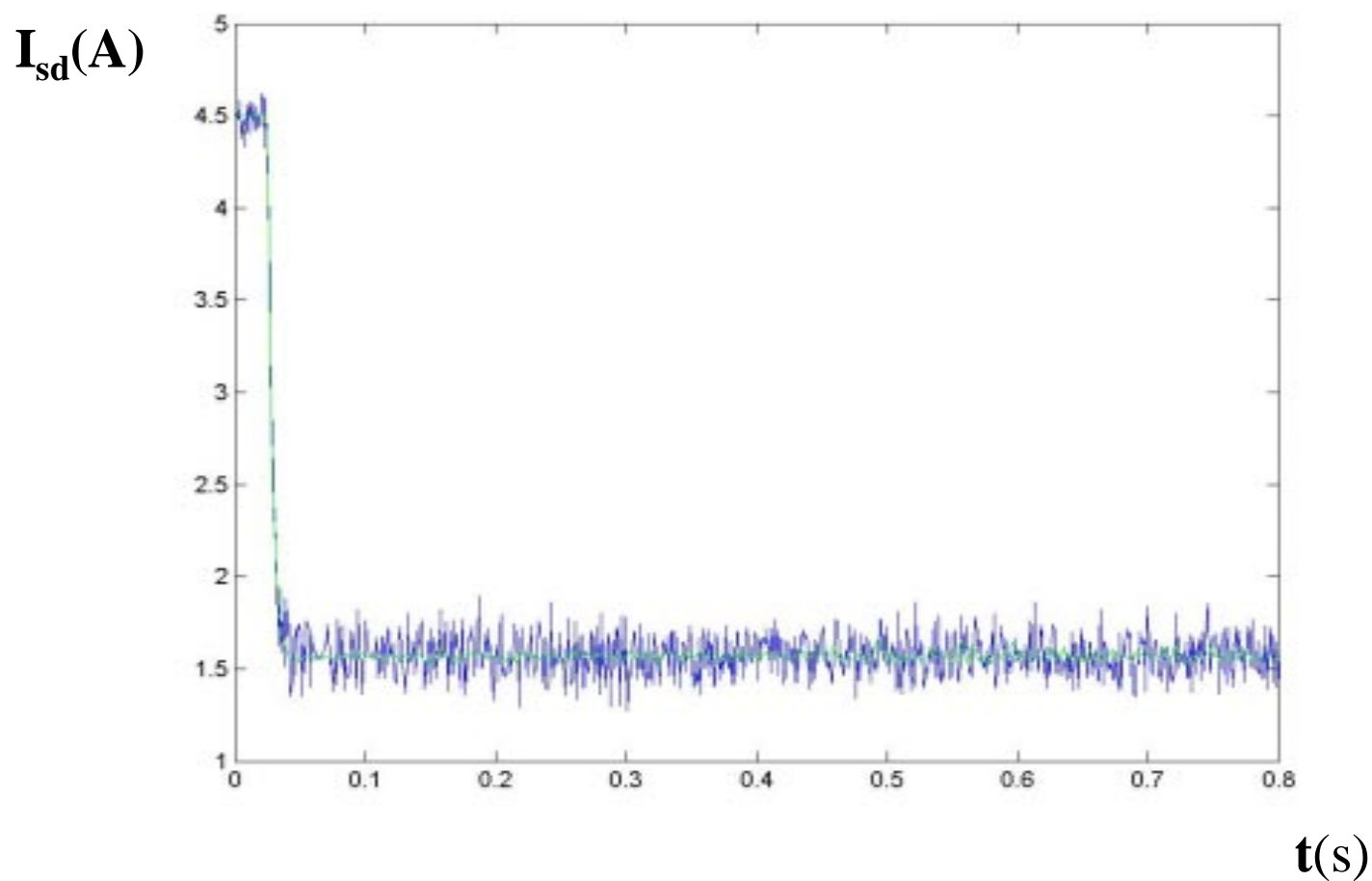
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

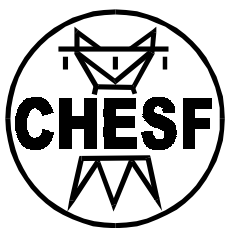


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

**Resultados Obtidos : Controle de corrente de eixo direto (fluxo)**





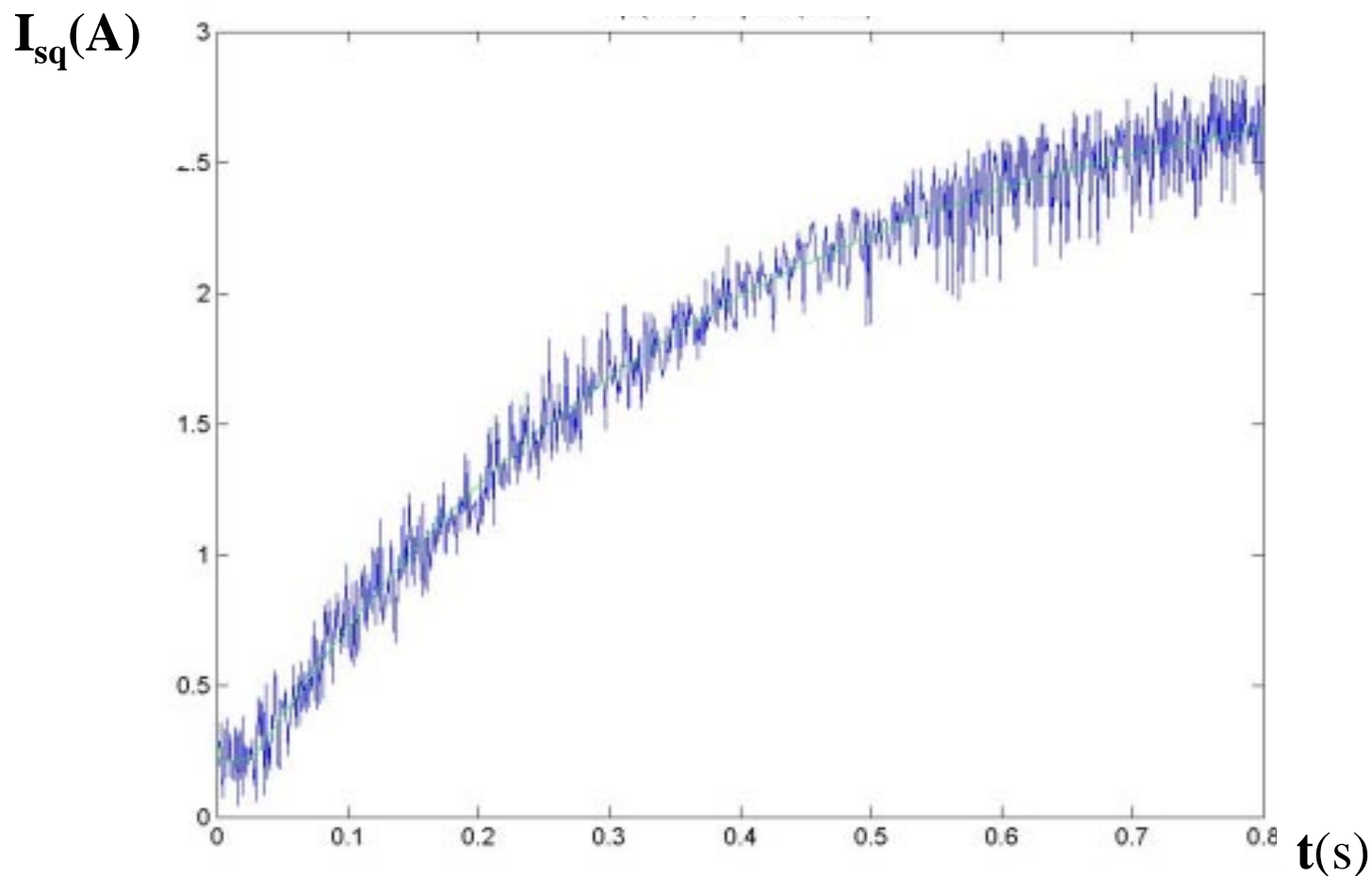
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

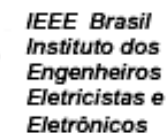


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Eletricistas e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

**Resultados Obtidos : Controle de corrente de eixo quadratura (conjugado)**

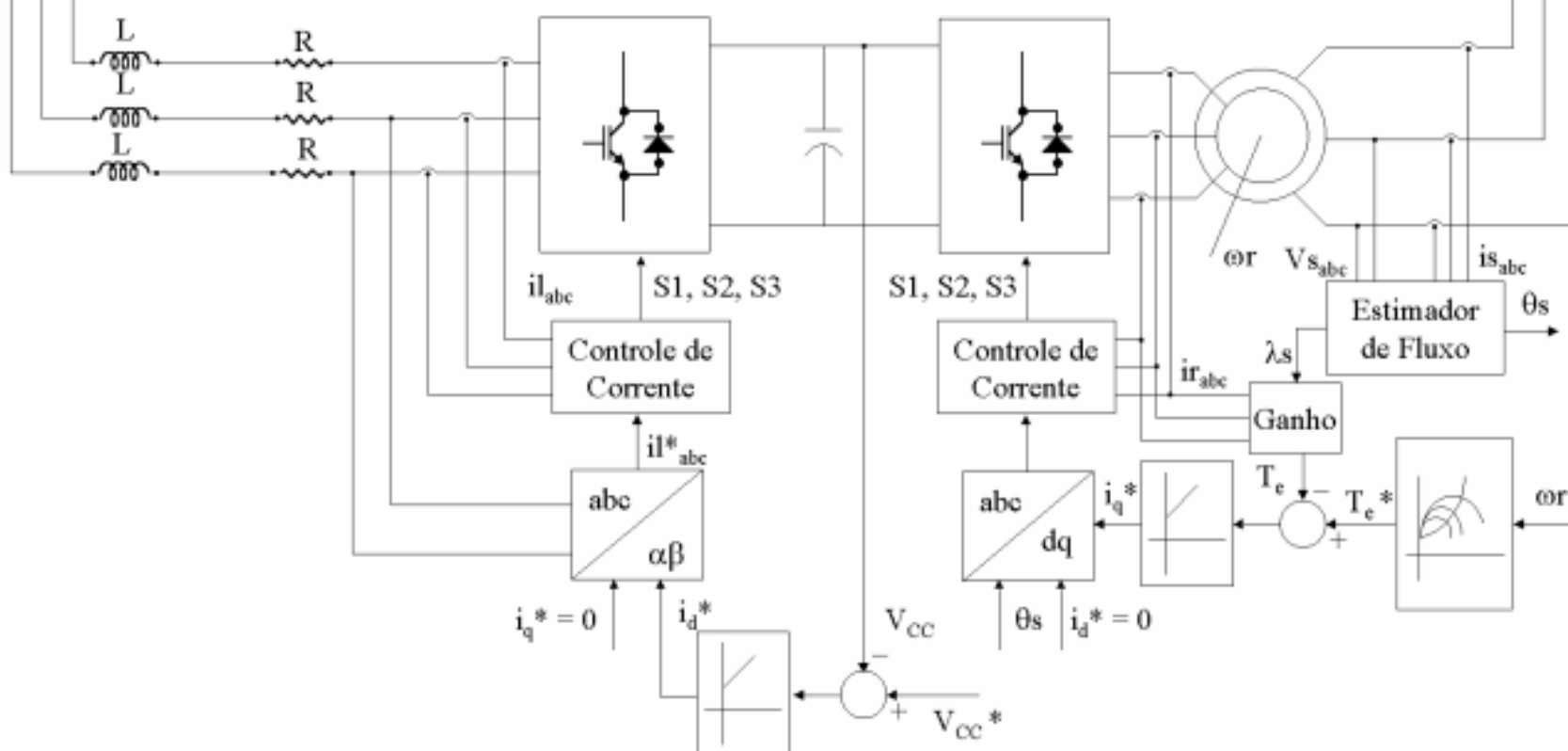


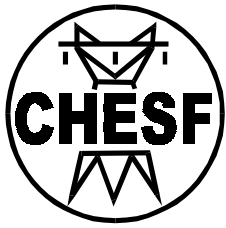


**"Networking  
the World"™™**

## Caso 2:

## Esquema de controle do gerador de indução duplamente alimentado



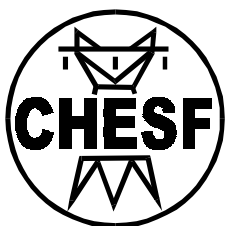


*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



***Modelagem e Considerações :***

- Controle dos conversores:
  - Lado da rede: orientação pelo vetor tensão
  - Lado da máquina: orientação pelo fluxo de estator
- Estimação de Fluxo pelo Modelo em Corrente;
- Malhas de Controle
  - Lado da rede:  $V_{dc}$ ,  $\cos\phi$  e correntes
  - Lado da máquina:  $P$  e  $Q$  geradas e correntes
- Conjugado primário imposto, extraído da Curva Ótima  $T_e \times$  Velocidade
- Fator de potência unitário;
- Controle de Potência só exigido após o estabelecimento  $V_{dc}$



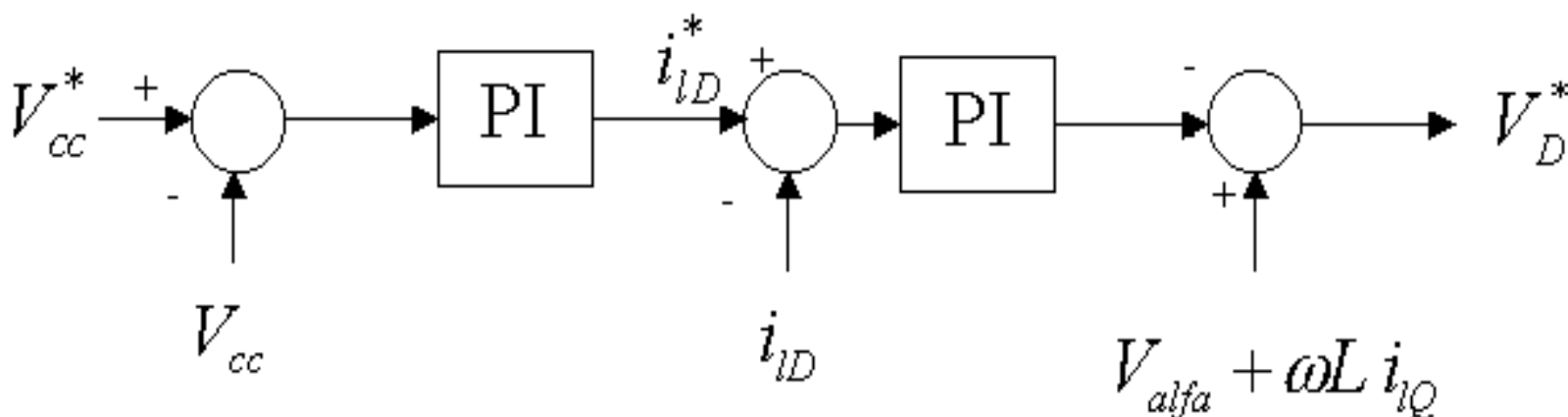
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



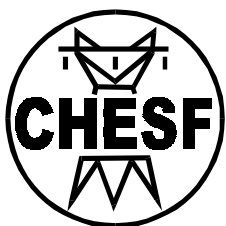
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

De modo análogo ao caso conectado pelo estator, foi feito o controle de P e Q do lado do conversor ligado à rede, assim, para  $V_{cc}$  (pelo controle de P) :







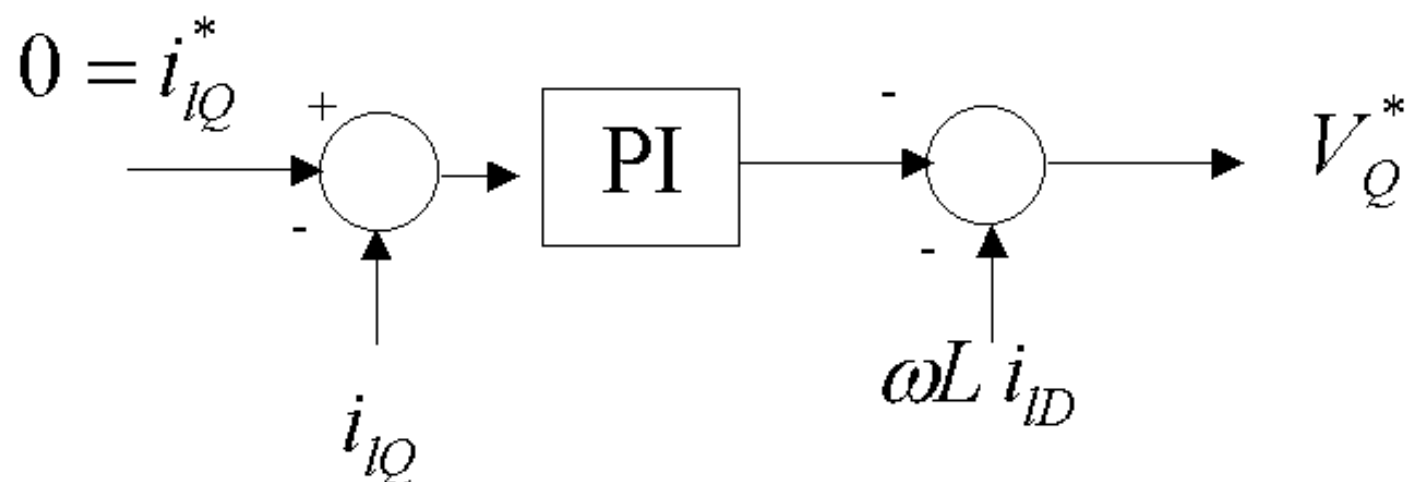
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

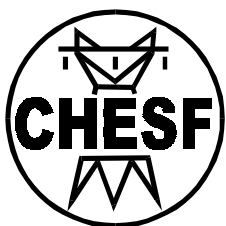


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

E o controle de Q :





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

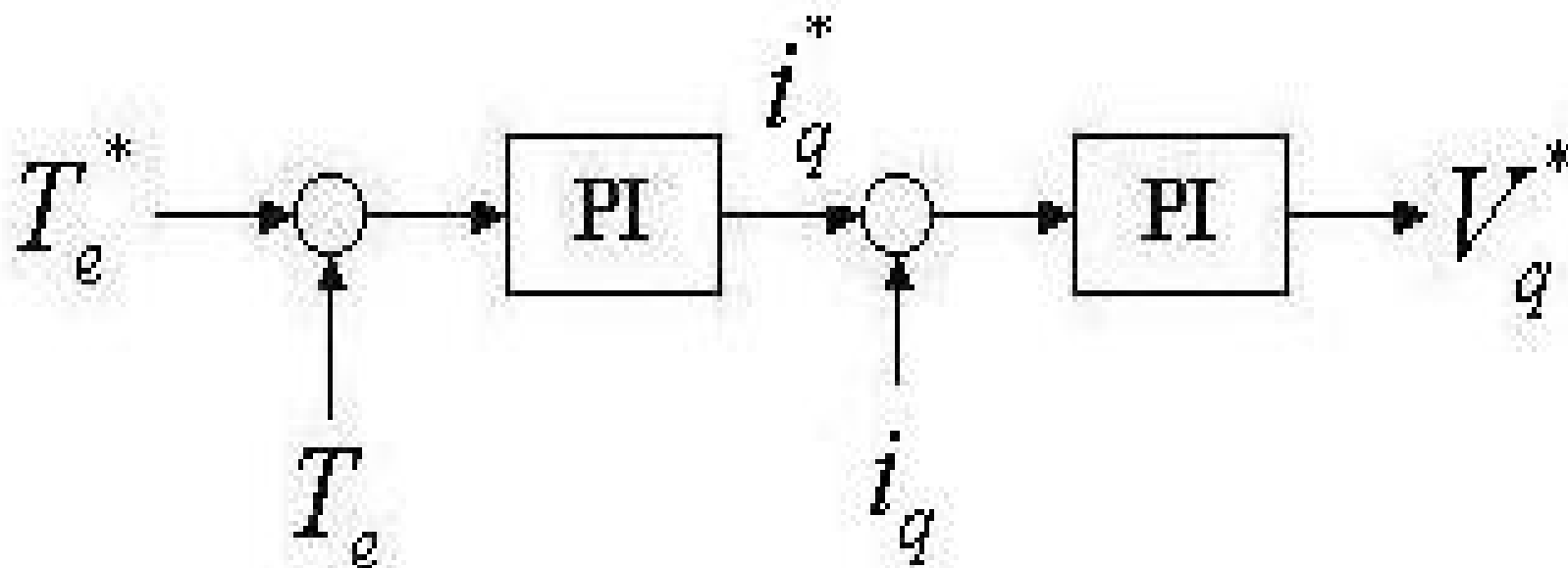


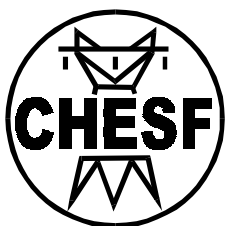
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

Baseando-se em que a conexão direta do estator à rede manterá o fluxo aproximadamente constante, torna-se desnecessário o controle do mesmo. Para o controle das potências, foram feitos os controles de P e Q, sendo :

$$T_e = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \lambda_{sd} \quad \text{e} \quad \frac{di_{rq}}{dt} = -\frac{R}{L} i_{rq} - \frac{1}{L} V_{convq}$$





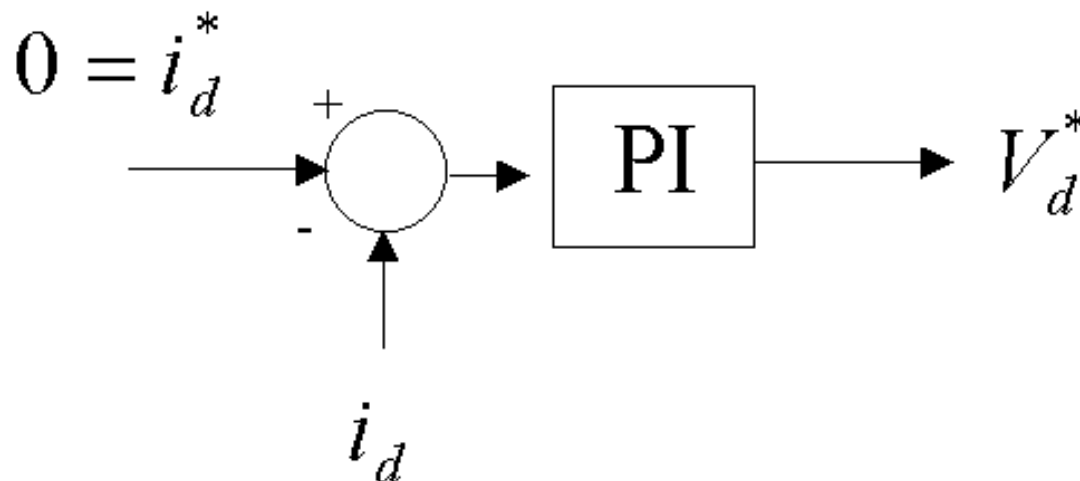
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

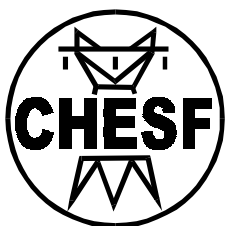


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

E assim, para o controle de Q, teremos:

$$\frac{di_{rd}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{rd} - \frac{1}{L}V_{convd}$$




*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

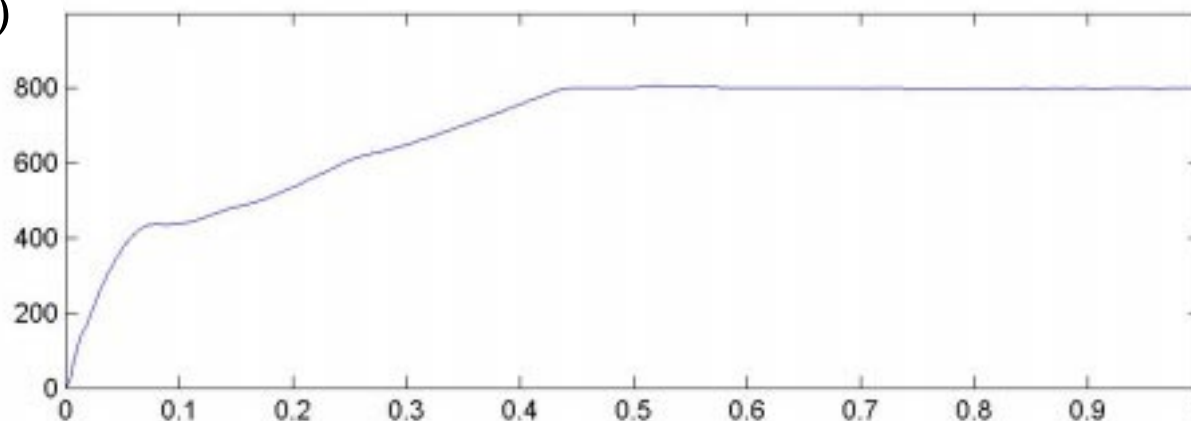


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

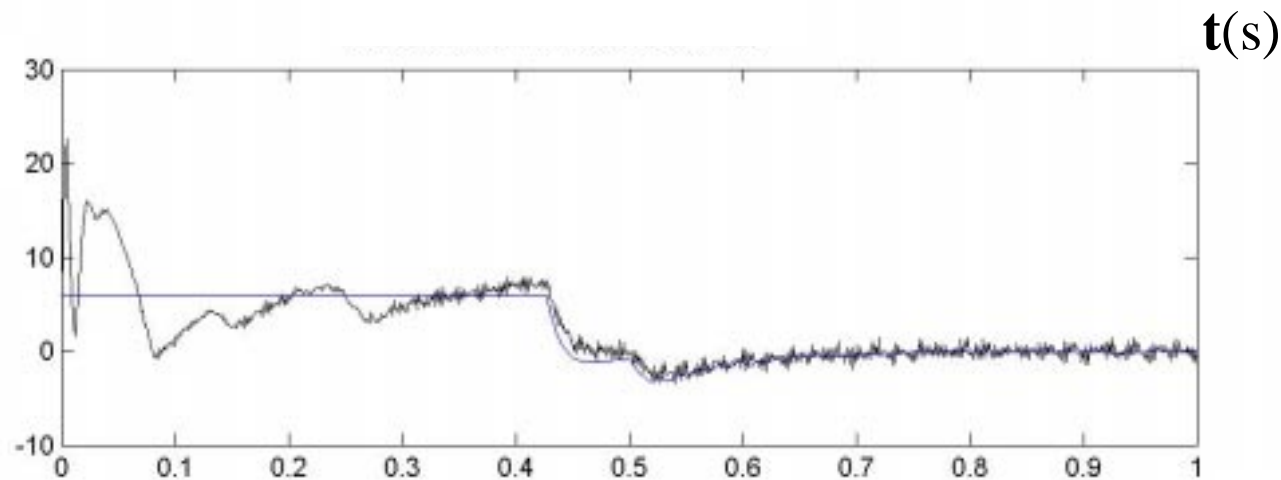
“Networking  
the World”™

## Resultados Obtidos : Controle da corrente de eixo direto e $V_{cc}$

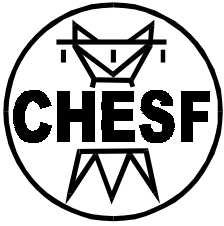
$V_{cc}(V)$



$I_{ID}(A)$



$t(s)$



*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

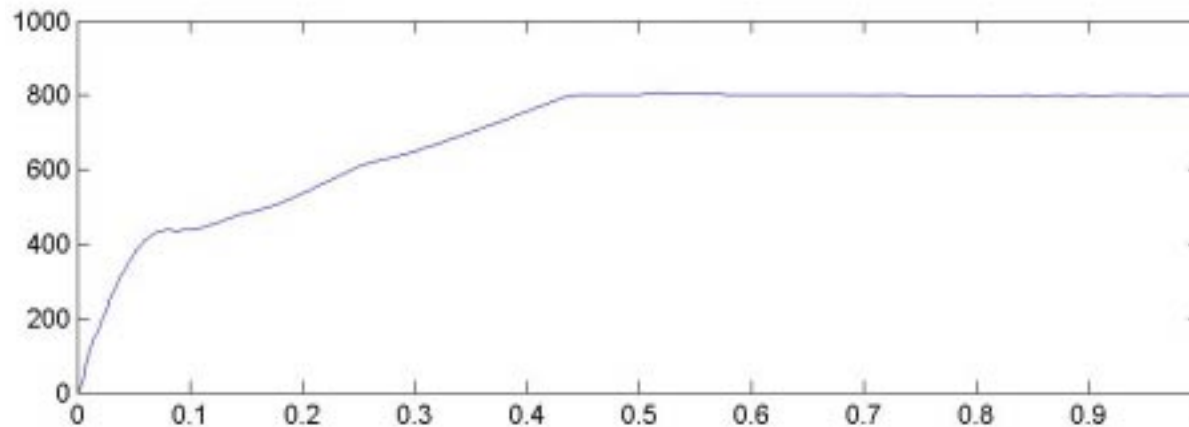


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

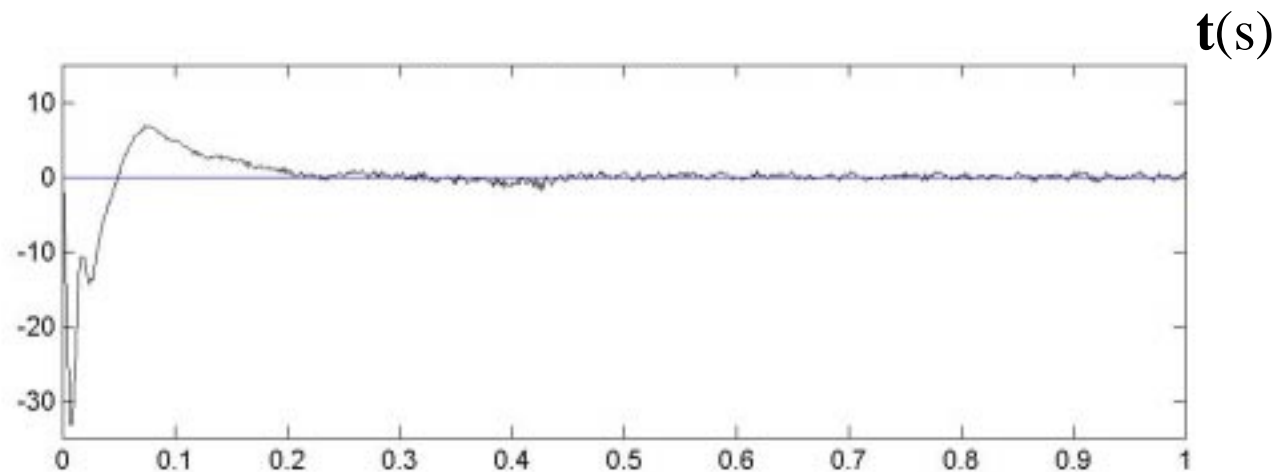
“Networking  
the World”™

**Resultados Obtidos : Controle da corrente de eixo em quadratura (fp)**

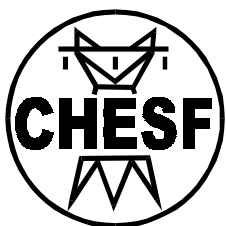
$V_{cc}(V)$



$I_{lQ}(A)$



$t(s)$



*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

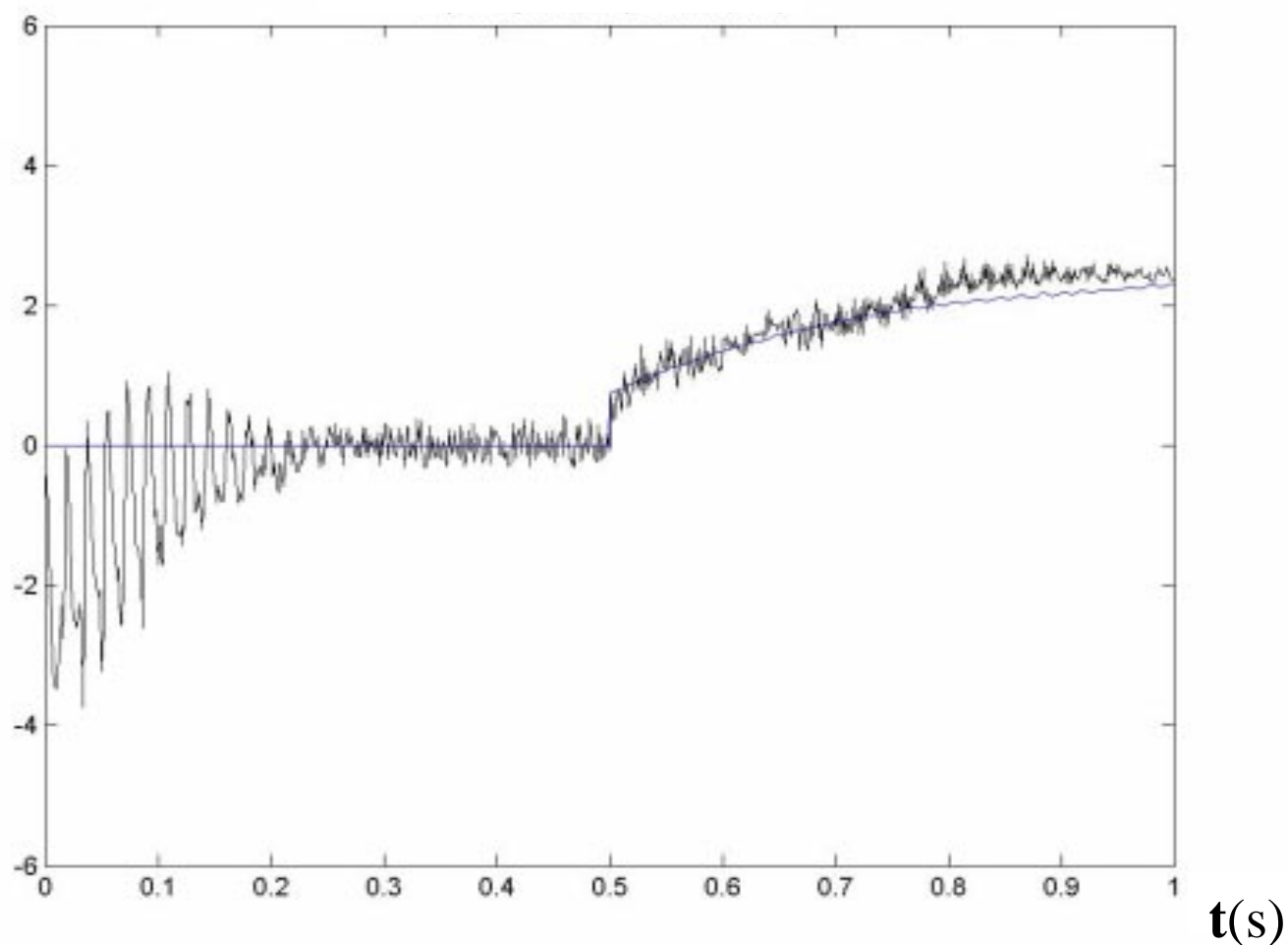


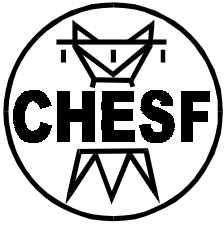
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

**Resultados Obtidos : Controle de corrente do lado da máquina (  $I_q$  )**

$I_{rq}(A)$





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

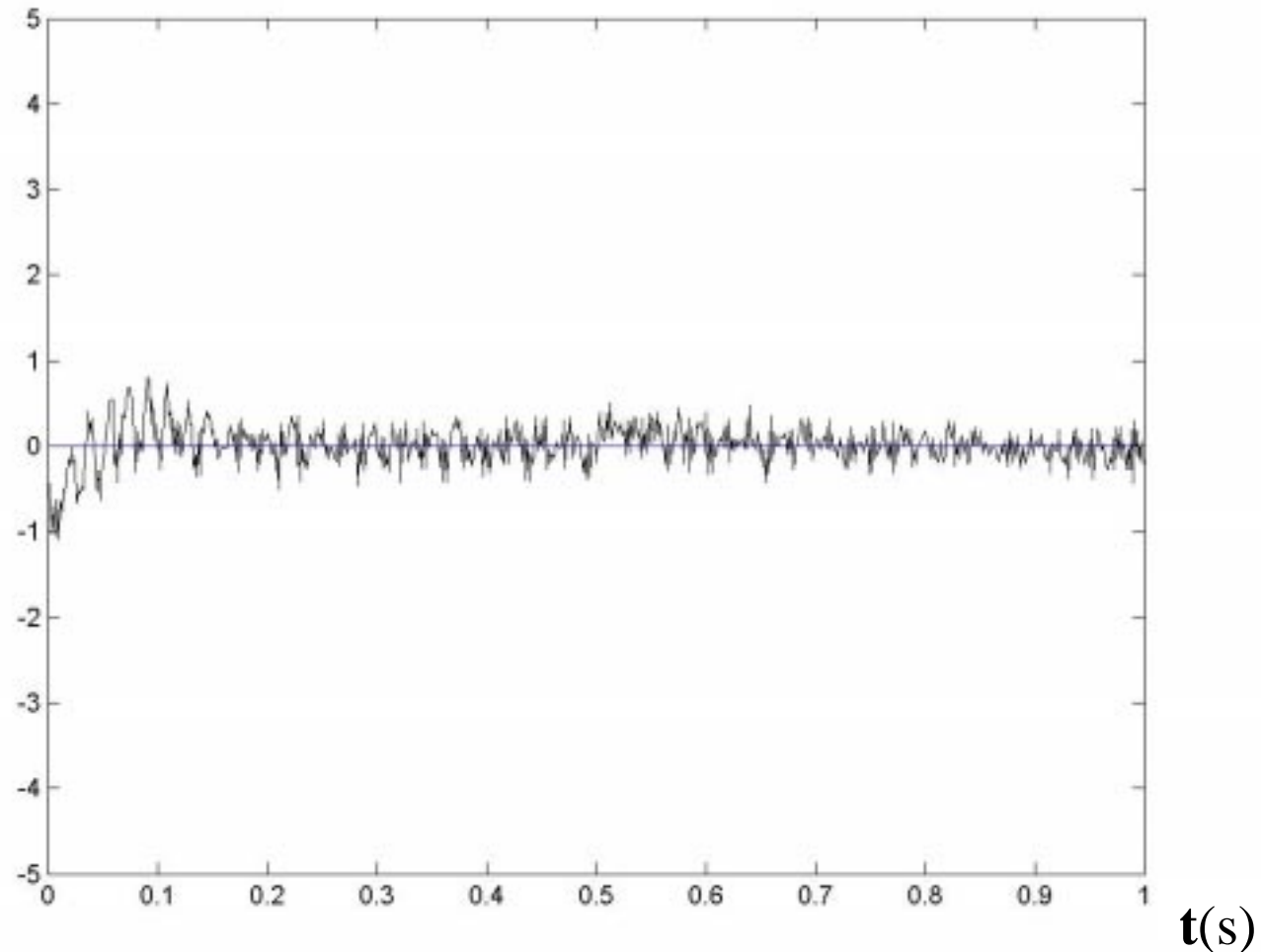


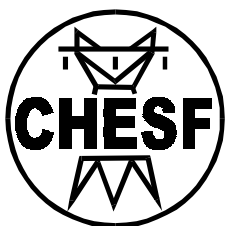
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

**Resultados Obtidos : Controle de corrente do lado da máquina (  $I_d$  )**

$I_{rd}(A)$





## *“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração Eólica com Máquina de Indução”*

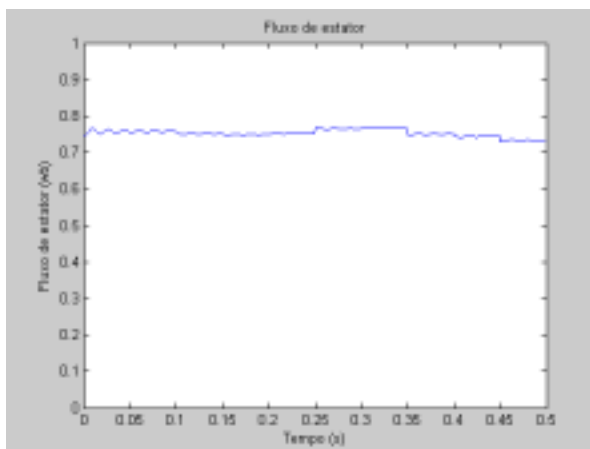
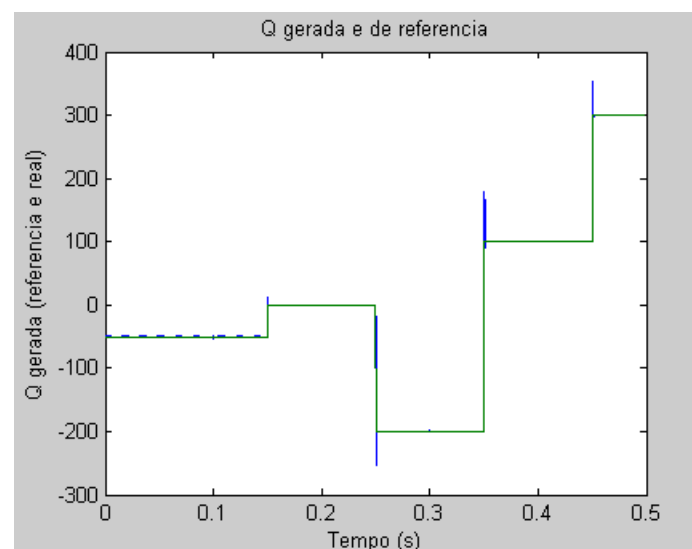
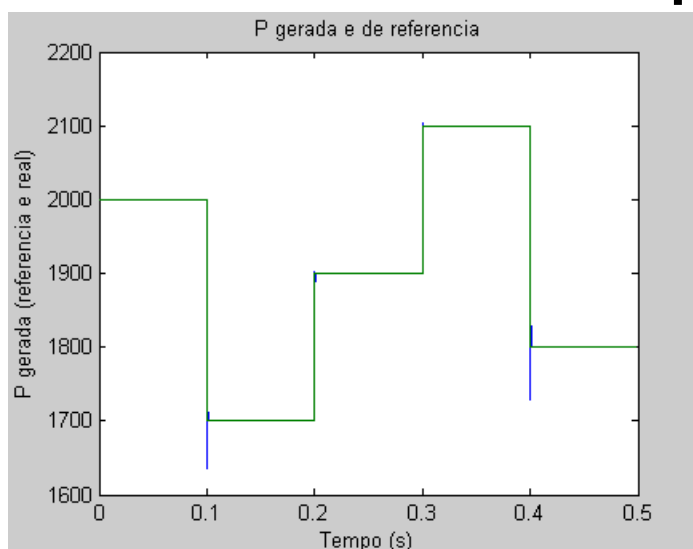


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

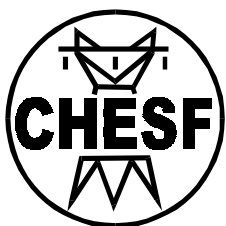
“Networking  
the World”™

### **Resultados Obtidos : Considerando a imposição de P e Q**

#### **Máquina acionada a $W_r$ constante**







## *“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração Eólica com Máquina de Indução”*

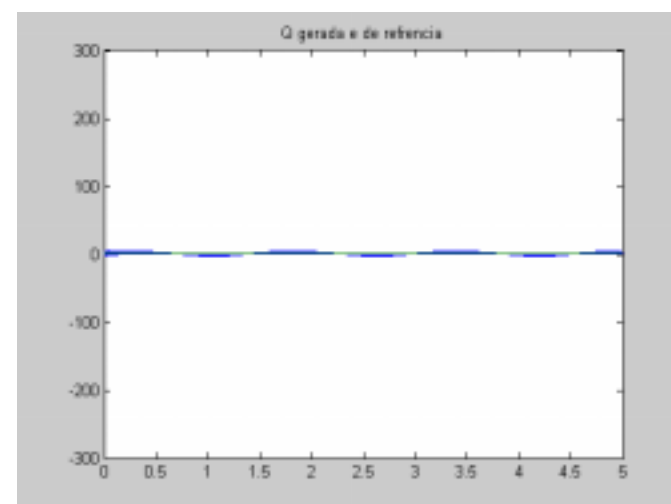
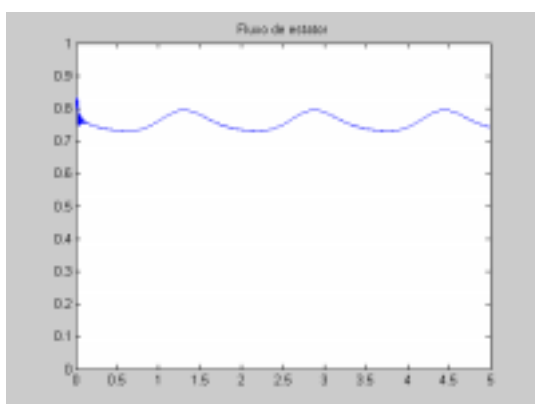
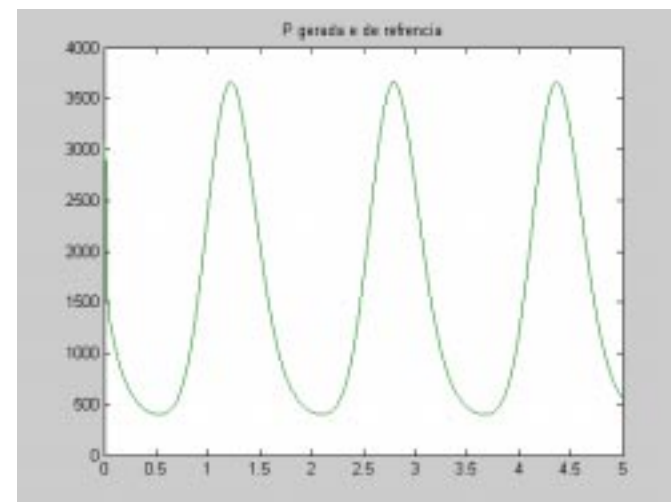
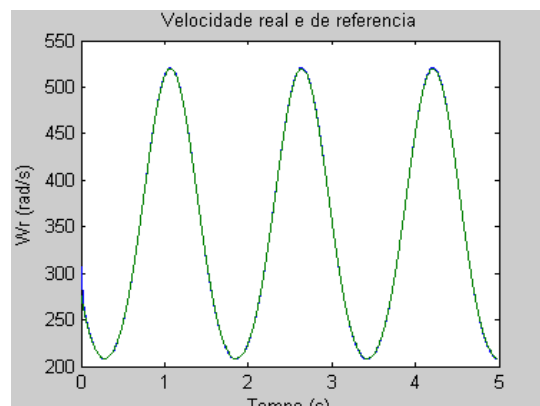
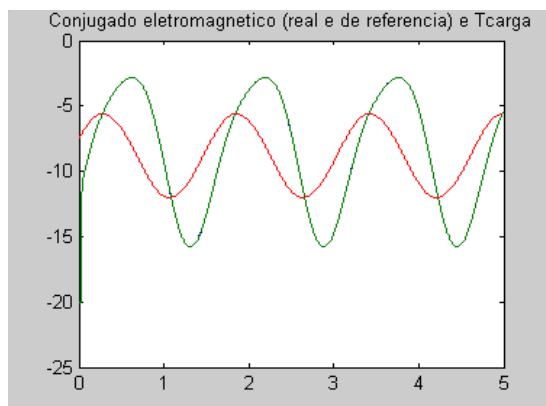


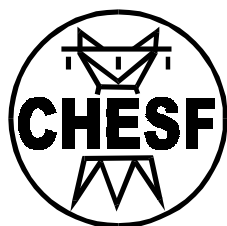
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

### Resultados Obtidos :

- Velocidade de vento:  $V_{\text{vento}} = 11 + 4 \cdot \cos(4 \cdot t)$
- Conjugado primário:  $T_{\text{carga}} = -0.8 \cdot V_{\text{vento}}$
- $W_{r\_otima} = 121.68 + 1.77 \cdot V_{\text{vento}} \cdot V_{\text{vento}}$





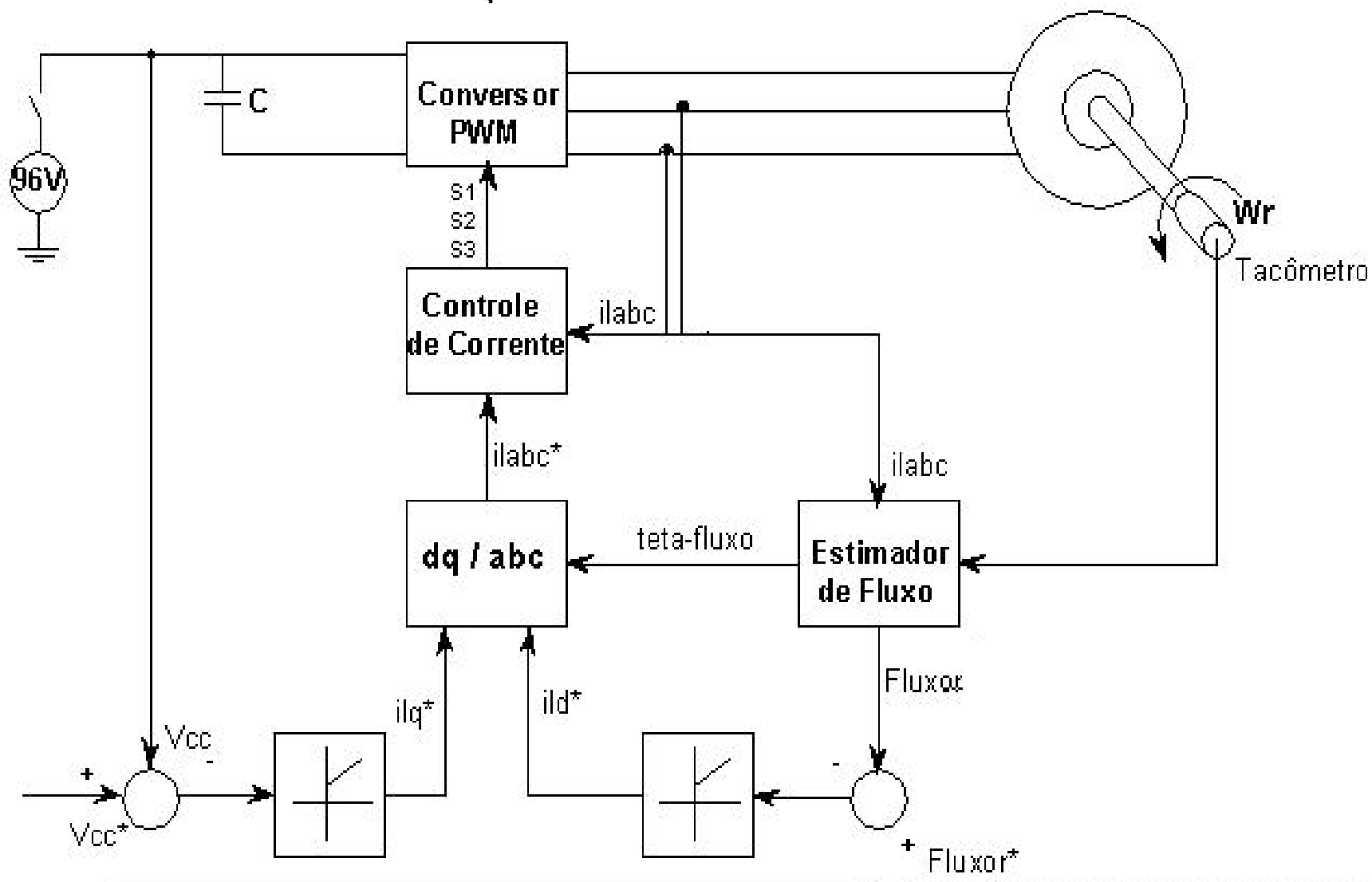
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

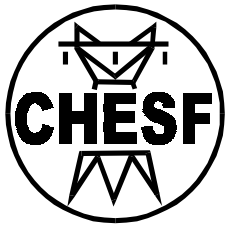


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

### Caso 3 : Gerador de Indução com Rotor Gaiola Isolado



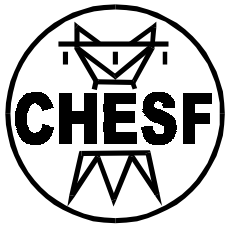


*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



**Considerações :**

- Controle do Conversor por orientação pelo Fluxo de Rotor;
- Malhas de Controle de Fluxo, Barramento CC e Correntes;
- Velocidade Mecânica de entrada como fonte primária de energia;
- Uso de Banco de Baterias para garantir magnetização da Máquina;
- Início da geração com no mínimo  $1/3$  da Velocidade Nominal da Máquina ( V cut in);



*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



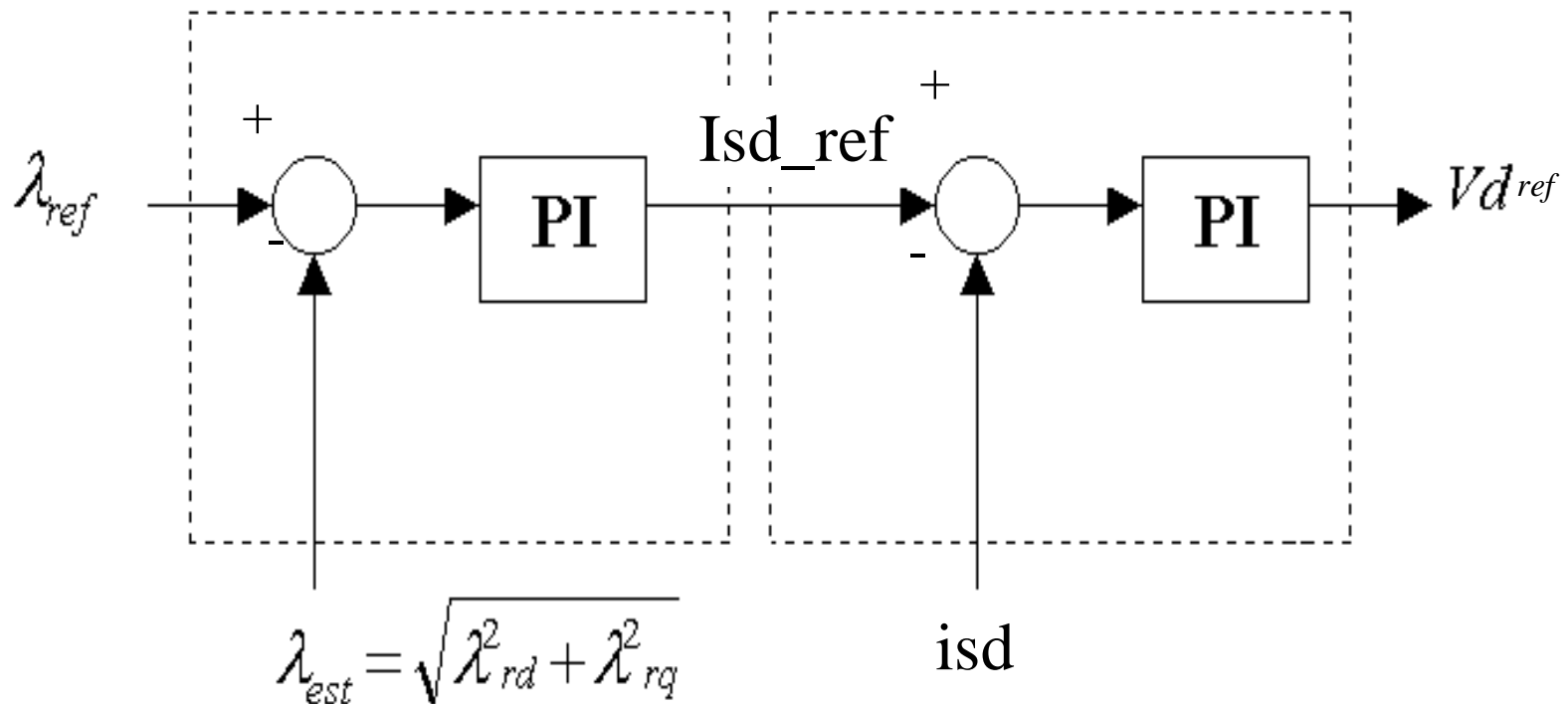
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

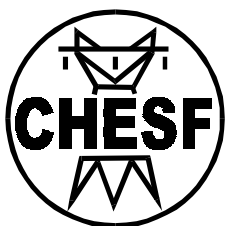
“Networking  
the World”™

**Controle de Fluxo de Rotor**

Fazendo  $\lambda_{rq} = 0$  e  $V_{rd} = 0 = R_r \left( \frac{\lambda_{rd}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{sd} \right) + \frac{d\lambda_{rd}}{dt}$  podemos escrever :

$$\frac{d\lambda_{rd}}{dt} + \frac{\lambda_{rd}}{\tau_r} = \frac{L_m}{\tau_r} i_{sd}$$





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

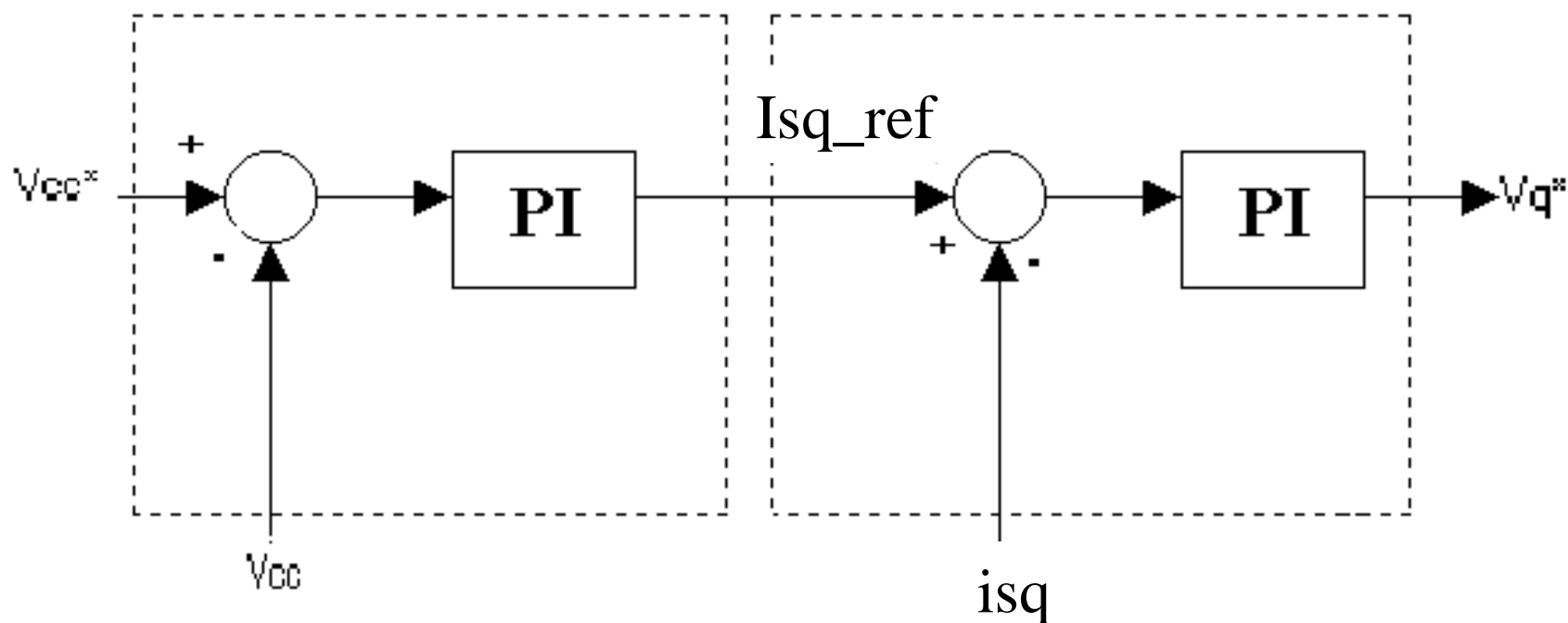
Para o controle da **tensão do barramento CC**, deve-se procurar impor valores adequados à corrente do capacitor. Desprezando as perdas :

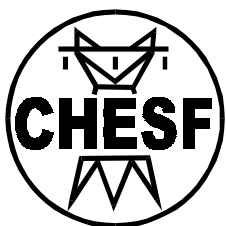
$$V_{cc} i_{conv} = P_{gerada} = -\frac{2}{Pólos} \omega_r T_e$$

e

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{rd} i_{sq},$$

então :





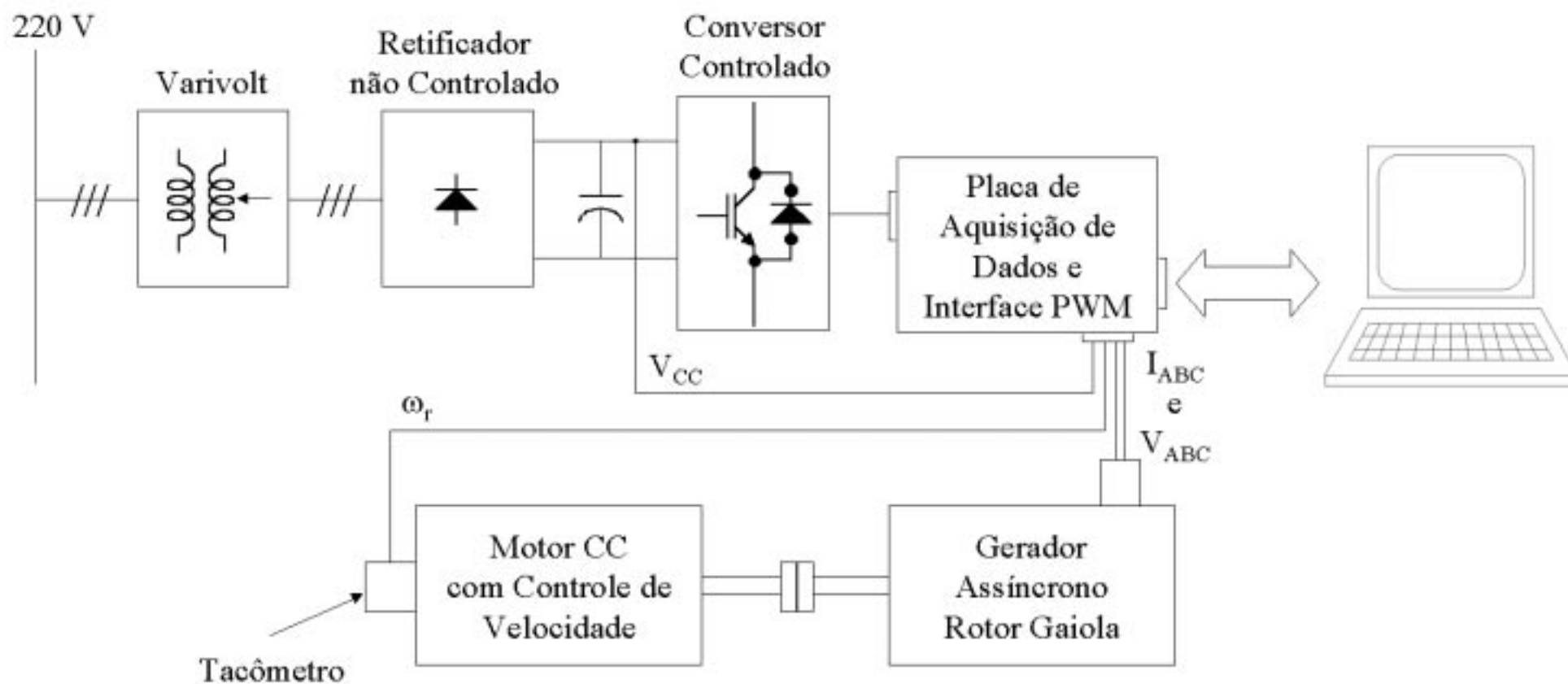
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

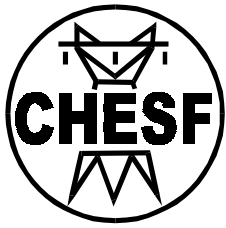


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

## Montagem Experimental



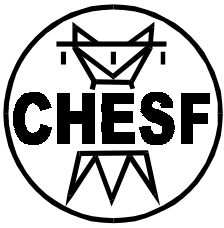


*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



## **Considerações :**

- Inicialmente, a máquina de indução estava completamente desmagnetizada e que a tensão do barramento era igual ao do banco de baterias, ou seja, 96 V;
- Considerando a existência de um certo conjugado primário, supôs-se que, quando a velocidade atingisse cerca de um terço do valor nominal, realizam-se a magnetização da máquina e o controle da tensão do barramento CC;
- Na prática, o fluxo foi limitado para que a  $f_{cem}$  da máquina fosse suficientemente baixa para permitir a imposição das correntes pelo barramento CC, ainda com tensão baixa. Depois que a tensão do barramento atingiu um valor suficientemente elevado, pôde-se ordenar a aplicação de fluxo nominal.



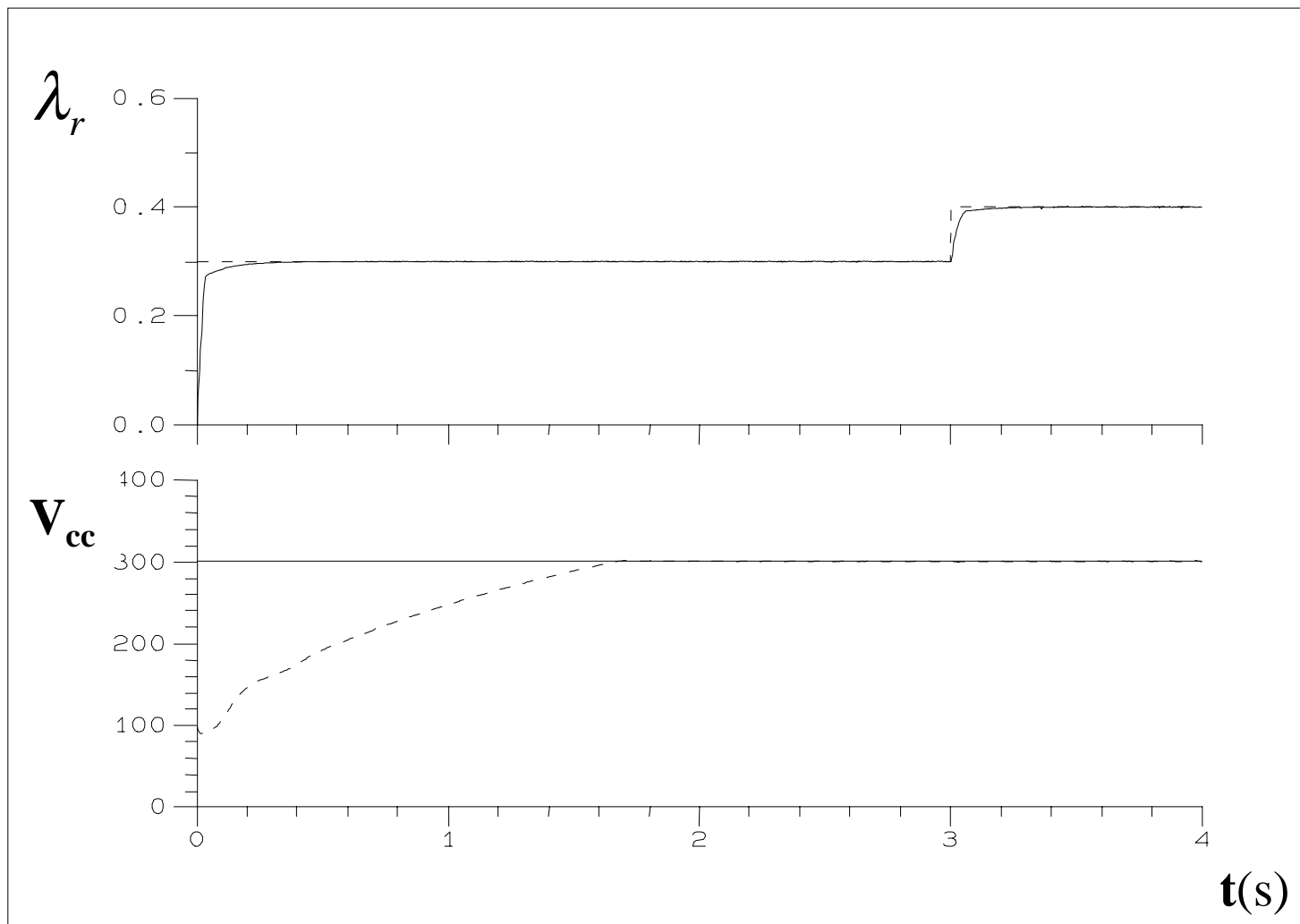
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



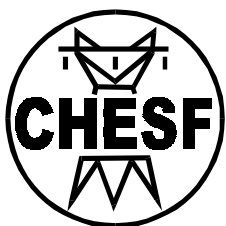
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

**Resultados Experimentais : Controle da tensão Vcc e do Fluxo de Rotor**







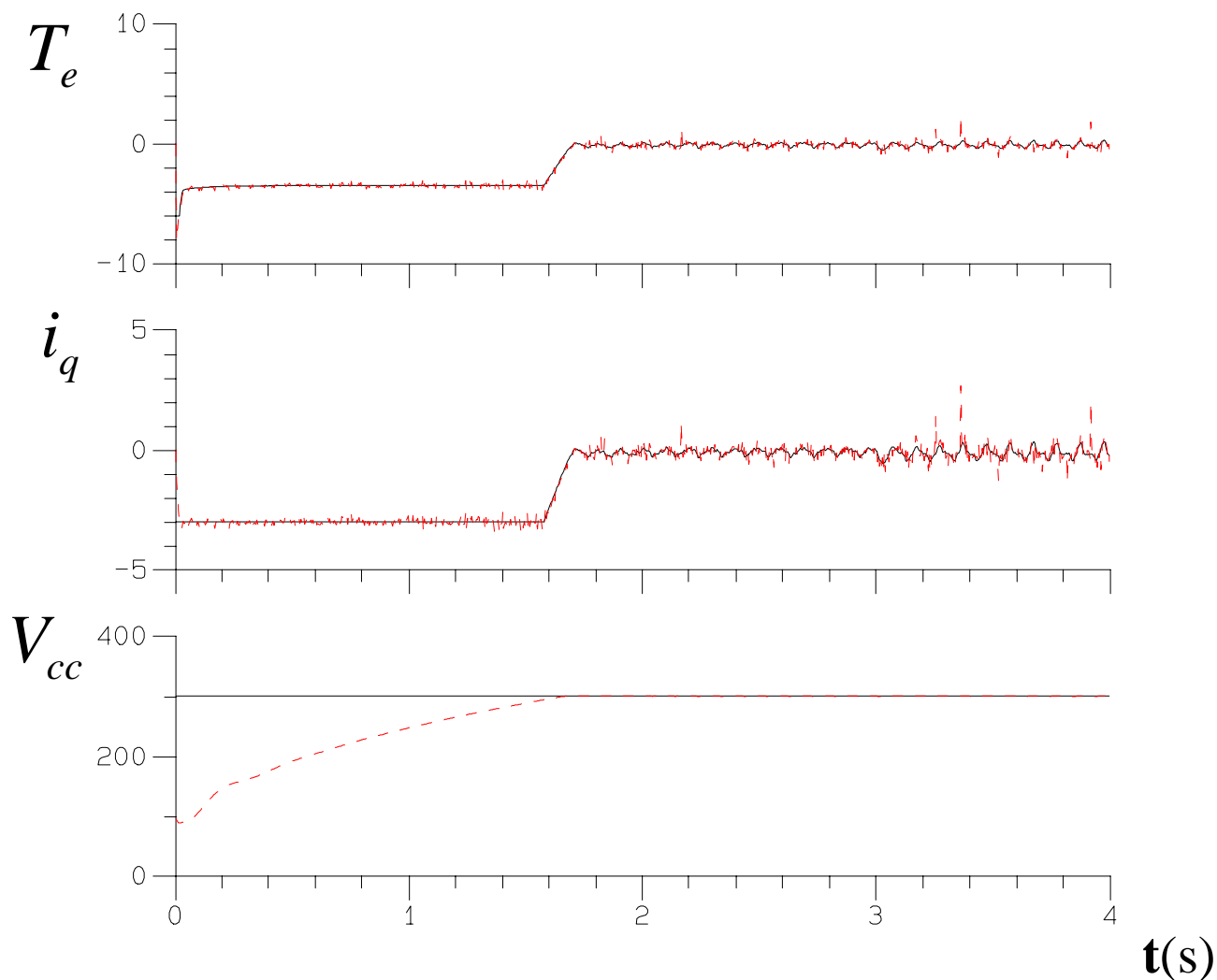
*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

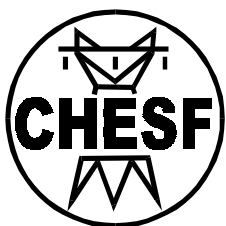


IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

## Resultados Experimentais : Controle de $I_q$ e $T_e$





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

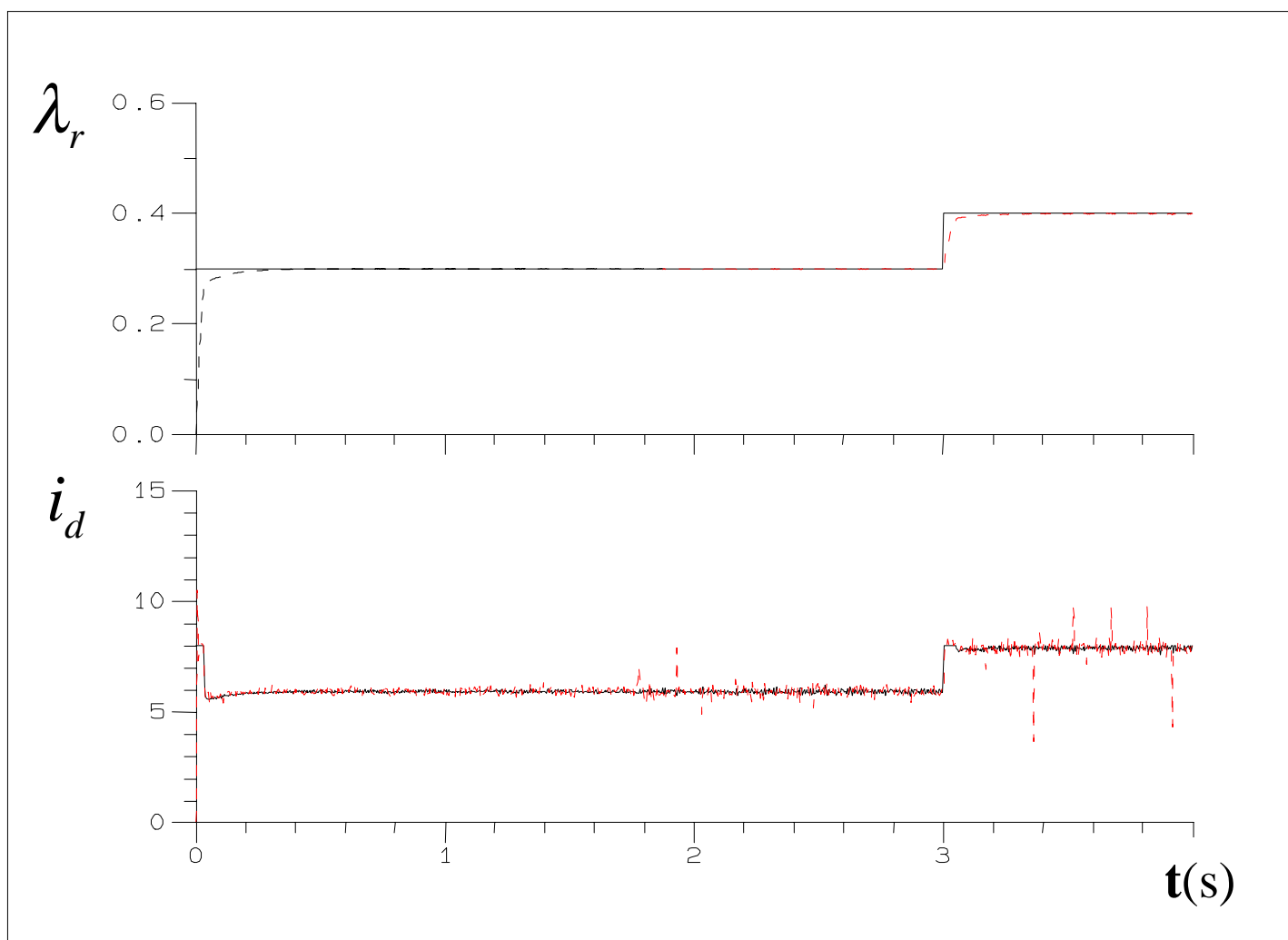


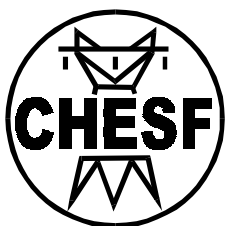
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Eletricistas e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

**Imposição de Carga Resistiva ao barramento CC de 480 Ohms :**

**Resultados Experimentais : Controle da corrente de eixo direto (fluxo)**





*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*

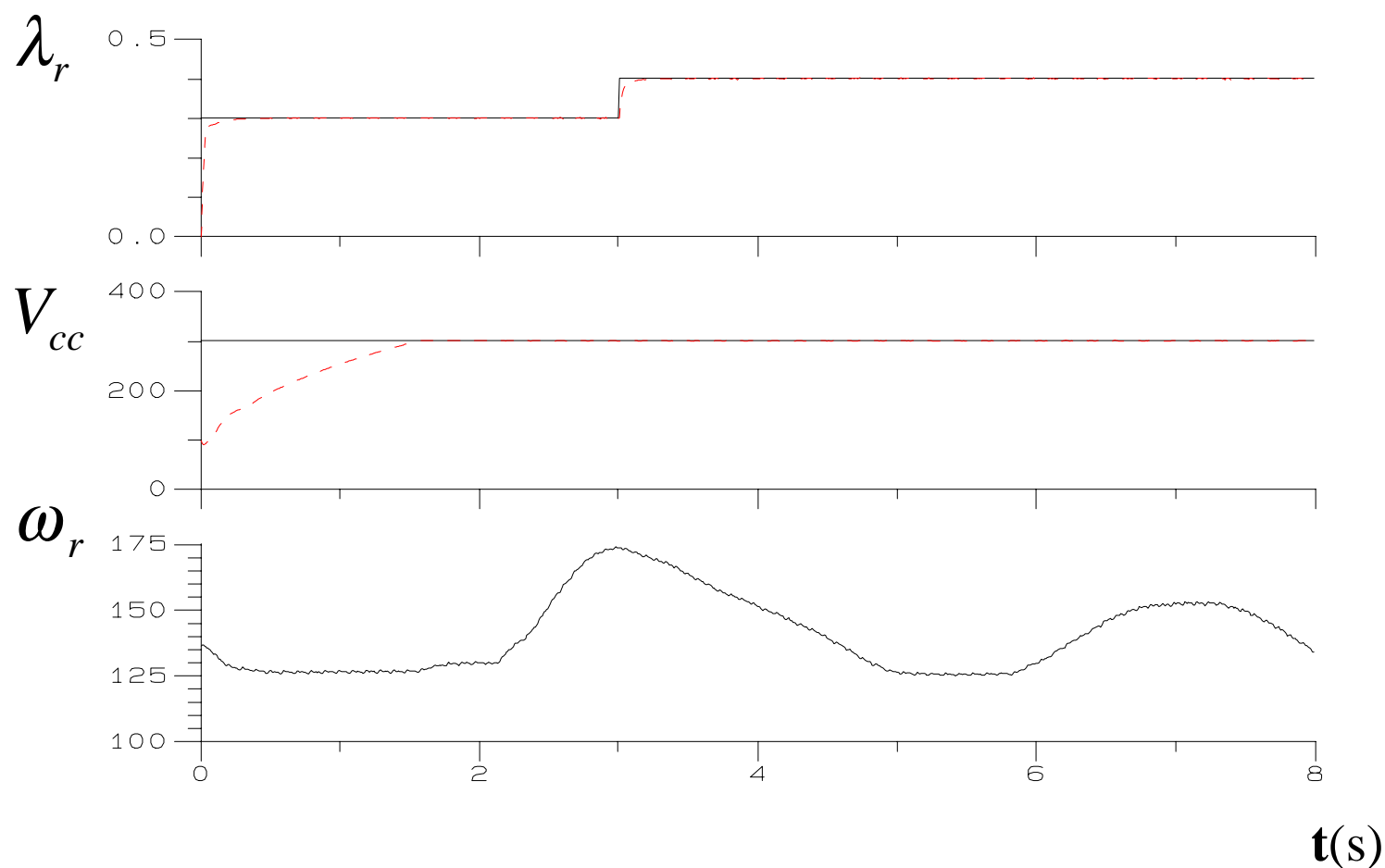


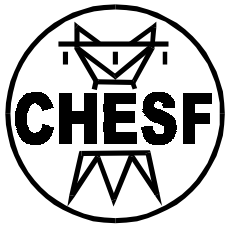
IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Elétricos e  
Eletrônicos

“Networking  
the World”™

**Variação de Velocidade da Máquina:**

**Resultados Experimentais : Controle da tensão  $V_{cc}$  e Fluxo**



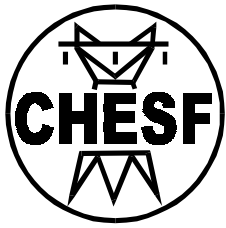


*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



**Conclusões :**

- Os grandes entraves para Instalações de Geradores Eólicos no Brasil ainda são a falta do domínio Tecnológico;
- O desenvolvimento dos algoritmos de simulação, incluindo três topologias distintas de uso de aerogeradores com máquinas de indução, e o bom desempenho dos controladores permitirão a análise futura do efeito da conexão de centrais eólicas em redes “fracas”. As estratégias de controle vetorial possibilitam o controle dos fluxos das potências ativa e reativa;
- As respostas dos ensaios experimentais foram consideradas satisfatórias, visto que atestaram as boas escolhas de estratégias de controle, métodos de orientação e alimentação;
- Alguns melhoramentos podem ser feitos, como um projeto mais sistemático dos ganhos dos controladores PI, a incorporação de elementos e restrições reais da rede elétrica, e outros.

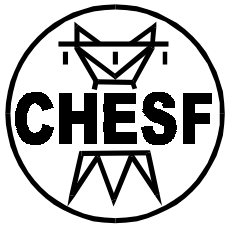


*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



## **Propostas de Estudos :**

- Adaptar os algoritmos desenvolvidos para o ATP
  - Incluir rede elétrica e aerogerador com todos os controles
- Obter, a partir de dados de turbinas, características Vvento x Potima
- Avaliar, usando programa em ATP
  - Impacto da injeção de potência pelos aerogeradores na QEE
    - Considerando aproveitamento máximo da turbina
    - Considerando injeção reduzida de P
    - Considerando injeção de Q
  - Definição de limites máximos de geração eólica
  - Propor alternativas para controle de P e Q de modo a minimizar os efeitos sobre a QEE
- É necessária a interação com empresas do setor elétrico (concessionárias, ONS, etc.)



*“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração  
Eólica com Máquina de Indução”*



## **Propostas de Estudos :**

- Em relação às estratégias de controle:
  - Avaliar o uso de outros níveis de frequência de chaveamento e amostragem;
  - Melhorar a inicialização do gerador isolado da rede;
  - Análise de outras estratégias de controle, como a DTC;
  - Análise harmônica dos sinais injetados na rede;
  - Realizar ensaios com conversores totalmente controlados CA/CC/CA, incluindo a conexão à rede elétrica;
  - Uso de outros métodos de estimação de fluxo;
  - Aprimorar a montagem realizada, como :
    - Incluir a medição de conjugado (aferir indiretamente o fluxo);
    - Substituir o tacogerador CC por um encoder;
    - Melhorar o projeto e/ou a confecção das placas, cabos, etc., reduzindo os problemas associados a ruídos e interferência eletromagnética.



IEEE Brasil  
Instituto dos  
Engenheiros  
Eletricistas e  
Eletrônicos

"Networking  
the World"™

IEEE Seção Bahia  
Capítulo Conjunto  
PES/IAS/PELS  
Nordeste 1

# *“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração Eólica com Máquina de Indução”*

Apoio :

