

---

# CONTROLADORES FUZZY APLICADOS AO CONVERSOR DE GERADORES DE INDUÇÃO DUPLAMENTE EXCITADOS EM SISTEMAS EÓLICOS INTEGRADOS A SISTEMAS DE POTÊNCIA

**João Paulo Abreu Vieira\***  
jpavieira@yahoo.com.br

**Ubiratan Holanda Bezerra\***  
bira@ufpa.br

**Marcus Vinicius Alves Nunes\***  
mvan@ufpa.br

**André Cavalcante do Nascimento†**  
borgonio@amazon.com.br

**Walter Barra Jr.\***  
walbarra@ufpa.br

\*Núcleo de Energia, Sistemas e Comunicações - (NESC).  
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará.  
Av. Augusto Correa, nº01, Campus Universitário do Guamá, CEP: 66075-900, Belém-PA, Brasil.

†Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-PA).  
Departamento de Ensino, CEFET-PA.  
Av. Almirante Barroso, nº1155, Marco, CEP: 66093-020, Belém-PA, Brasil

---

## ABSTRACT

This paper presents new fuzzy control strategies for application on the control of the static converter that connects the doubly fed induction generator into the electrical grid in variable speed wind generation systems. The proposed control strategies are of the type “look-up-table” with supervision. The performance of these intelligent regulators is compared with those obtained with constant gain PI’s controllers, when the electrical power systems is submitted to faults. The fuzzy controllers are intended to ensure the continuous operation of the static converter, even during the fault period, and at the same time to improve the transient performance of the electrical system as compared with the case of using PI conventional controllers. The results presented confirm the efficiency of the proposed control strategies. The mathematical

models that represent the dynamics of the wind turbines and generators were implemented using computational programs developed in MATLAB<sup>TM</sup>.

**KEYWORDS:** Doubly fed Induction Generators, Static Converter, Variable Speed Wind Generators, Fuzzy Control, Power System Transient Stability.

## RESUMO

Este artigo apresenta novas estratégias de controle fuzzy aplicadas ao conversor estático interligado ao rotor dos geradores de indução duplamente excitados (DFIG), em esquemas eólicos de velocidade variável, integrados a redes elétricas reais. As estratégias de controle propostas são do tipo fuzzy “look-up-table” com supervisão. O desempenho de tais reguladores, baseados em inteligência computacional, é comparado com o obtido com controladores PI’s a parâmetros fixos, na ocorrência de faltas no sistema elétrico de potência. Esses controladores fuzzy são destinados a garantir a continuidade da operação dos conversores, e melhorar o desempenho tran-

---

Artigo submetido em 05/07/2006  
1a. Revisão em 02/10/2006  
2a. Revisão em 21/02/2007  
Aceito sob recomendação do Editor Associado  
Prof. Carlos A. Castro

sitório do sistema, em relação aos controladores convencionais. Os resultados apresentados confirmam a eficácia das estratégias de controle adotadas. O modelo físico dos aerogeradores, consistindo de um grande número de turbinas eólicas, foi implementado através de uma ferramenta de simulação dinâmica, desenvolvida no ambiente computacional MATLAB<sup>TM</sup>.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gerador de Indução Duplamente Excitado, Conversores Estáticos, Aerogeradores de Velocidade Variável, Controle Fuzzy, Estabilidade Transitória.

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da integração de geradores de indução duplamente excitados (DFIG) controlados por conversores estáticos, em esquemas eólicos de velocidade variável, nas redes elétricas é atualmente uma tendência generalizada em muitos países. Esse fato, está diretamente relacionado com a flexibilidade do controle oferecido pelos conversores estáticos que possibilitam manter a tensão terminal constante quando a máquina opera em velocidade variável, permitindo o controle independente de potência ativa e reativa que a máquina troca com a rede elétrica, com a máxima eficiência no aproveitamento da energia eólica (Vieira et al, 2006).

A desvantagem do DFIG é a sua operação durante faltas no sistema elétrico. Neste caso os limites da corrente do rotor tem possibilidade de serem ultrapassados, podendo causar danos ao conversor eletrônico (Morren et al, 2005). No sentido de evitar que tais situações ocorram, é adotado um sistema de proteção, nos quais os terminais do rotor do DFIG são curto-circuitados (crow-bar), desativando os conversores, ou seja, as malhas de controle são bloqueadas, o que gera uma menor margem de estabilidade transitória. Por outro lado, com os controladores bem projetados, é possível evitar o aumento excessivo da corrente do rotor durante a ocorrência de distúrbios, garantindo a continuidade de operação dos conversores, e como consequência o aumento da estabilidade transitória do sistema.

Este tipo de controle do conversor para um sistema DFIG é realizado por controladores proporcionais e integrais (PI's), os quais possuem estrutura simples e desempenho razoavelmente robusto. Contudo, o sucesso do controlador PI, e consequentemente, o melhor desempenho da máquina dependem das escolhas apropriadas dos ganhos proporcionais e integrais. A sintonização desses ganhos para um desempenho ótimo não é tarefa trivial, ainda mais quando o processo pode sofrer variações durante a operação e ser não-linear, uma vez que as equações dinâmicas que descrevem o comportamento do DFIG apresentam não-linearidades e termos acoplados que afetam o desempenho dos reguladores (Almeida et al, 2004). Estratégias de controle convencionais, a parâmetros

fixos, geralmente costumam apresentar um pobre desempenho quando o sistema é submetido a grandes perturbações ou, mesmo, quando o sistema é levado a operar em condições relativamente diferentes daquelas para as quais o controlador convencional foi projetado (Wang, 1997).

Uma vez que o controle fuzzy possibilita a supervisão inteligente, baseada apenas em informações qualitativas sobre a operação da máquina elétrica, o mesmo surge como um método heurístico que pode melhorar o desempenho da mesma. Portanto, a utilização de controladores fuzzy em sistemas eólicos de velocidade variável, permite manter o desempenho do sistema de controle sempre ajustado às atuais condições operacionais e à estrutura da planta, reduzindo o pico de corrente do rotor e aumentando a margem de estabilidade eletromecânica, melhorando assim, o comportamento transitório em relação aos reguladores PI's convencionais, na ocorrência de faltas no sistema elétrico.

## 2 MODELO DA TURBINA EÓLICA

O modelo implementado para a turbina eólica parte da potência mecânica da mesma a qual é calculada pela seguinte expressão (Heier, 1998):

$$P_{mec} = 0.5\rho C_p \pi r^2 U_w^3 \quad (1)$$

Sendo:

**r** - raio do rotor da turbina eólica (m);

**U<sub>w</sub>** - velocidade média do vento (m/s);

**ρ** - massa específica do ar (kg m<sup>3</sup>);

**C<sub>p</sub>** - coeficiente de potência.

Para obtenção de C<sub>p</sub> em uma determinada velocidade de vento, o rotor da turbina deve ser controlado, girando a uma velocidade angular que resulte na razão entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento, apresentada a seguir:

$$\lambda = \frac{r\omega_t}{U_w} \quad (2)$$

Onde:

**ω<sub>t</sub>** - velocidade de rotação do eixo da turbina eólica.

Em esquemas eólicos de velocidade variável, C<sub>p</sub> é função de λ e β (ângulo de passo), como descrito nas equações (3) e (4) (Slootweg et al, 2003):

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left( \frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (3)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} + \frac{0.003}{\beta^3 + 1}} \quad (4)$$

### 3 MODELO DO DFIG

O modelo dinâmico do DFIG considera duas equações algébricas para o estator, duas equações dinâmicas para o rotor, mais a equação de balanço de potência. Os transitórios do estator são desprezados neste modelo, devido sua rápida extinção. Desta forma, as equações em p.u., na base nominal do gerador, representadas em função de uma tensão atrás de uma reatância transitória para estudos de estabilidade transitória, são descritas a seguir (Kundur, 1994; Nunes et al, 2003):

$$V_{ds} = V'_d - r_s i_{ds} + X'_a i_{qs} \quad (5)$$

$$V_{qs} = V'_q - r_s i_{qs} - X'_a i_{ds} \quad (6)$$

$$\frac{dV'_d}{dt} = \frac{1}{T_o} \cdot \left[ -V'_d + (X_a - X'_a) i_{qs} \right] + s\omega_s V'_q - \omega_s \frac{X_m}{X_{rr}} V_{qr} \quad (7)$$

$$\frac{dV'_q}{dt} = \frac{1}{T_o} \cdot \left[ -V'_q - (X_a - X'_a) i_{ds} \right] - s\omega_s V'_d + \omega_s \frac{X_m}{X_{rr}} V_{dr} \quad (8)$$

Onde:

$X_{rr}, X_m$  - Reatâncias do estator, rotor e mútua, respectivamente (pu);

$X_a$  - reatância de circuito aberto da máquina de indução em regime permanente (p.u.);

$X'_a$  - reatância transitória de circuito aberto da máquina de indução (p.u.);

$V'_d, V'_q$  - componentes da tensão atrás da reatância transitória  $X'_a$  (p.u.);

O torque eletromagnético em p.u. é dado por:

$$T_e = V'_d i_{ds} + V'_q i_{qs} \quad (9)$$

A equação de balanço adotada para aerogeradores de velocidade variável em estudos de estabilidade transitória, é dada pela equação a seguir:

$$2H_G \frac{d\omega_G}{dt} = (T_m - T_e - D\omega_G) \quad (10)$$

Onde:

$H_G$  é a constante de inércia da turbina em (seg) e  $\omega_G$  é a velocidade angular do rotor do gerador em (p.u) e  $D$  corresponde ao coeficiente de amortecimento da carga (p.u).

O torque mecânico é obtido diretamente a partir da relação entre a potência mecânica, proveniente da equação (1), e a velocidade mecânica do rotor da turbina eólica.

Neste artigo é utilizado o modelo de massa única, devido à presença dos conversores estáticos na interligação da máquina com a rede, que funcionam como um filtro, desacoplando a frequência da rede elétrica da frequência do gerador (Nunes, 2003; Sloopweg, 2003).

### 4 MODELO DOS CONVERSORES DO DFIG

Para o modelo dos conversores, assume-se que a tensão no link "cc" seja constante. O conversor interligado ao rotor (C1) é modelado como fonte de tensão e o conversor interligado à rede elétrica (C2) é modelado como fonte de corrente. O sistema de controle do conversor C1 do DFIG será estabelecido em dois níveis: controle da corrente do rotor em um nível interno e controle da velocidade e tensão em um nível mais externo (Nunes et al, 2005). Neste sistema, o conversor C1 controla a tensão do rotor, e, portanto, o torque eletromagnético da máquina e a potência reativa que o estator troca com a rede elétrica e o conversor C2 é responsável pelo controle adicional da tensão, através do aumento da potência reativa gerada (Holdsworth et al, 2002). O diagrama esquemático do DFIG, conversores estáticos e reguladores é descrito na figura 1 a seguir:

Neste artigo, somente o controle do conversor C1 é utilizado para a supervisão inteligente. A estratégia de controle adotada para o conversor C2 mantém a tensão no link "cc" constante, operando com fator de potência unitário. A implementação das malhas de controle propostas para o torque eletromagnético ou velocidade do rotor e a potência reativa ou tensão é mostrada a seguir na figura 2 (Nunes et al, 2003):

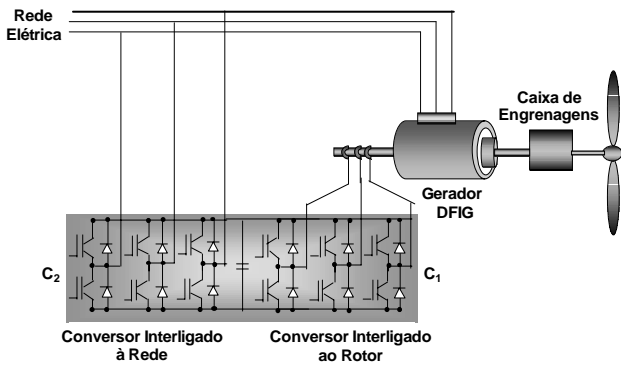


Figura 1: Diagrama esquemático do DFIG.

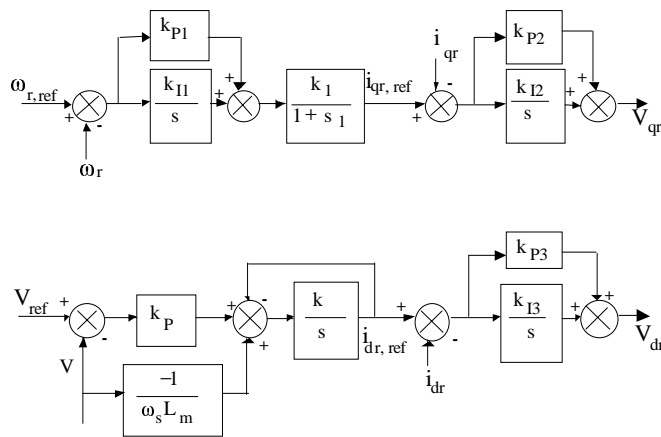


Figura 2: Controladores de Velocidade e de Tensão

## 5 CONTROLADORES FUZZY

Neste item, é mostrada a arquitetura típica de um sistema de controle fuzzy, ilustrada na figura 3. Um controlador fuzzy é normalmente composto dos seguintes blocos: O fuzzyficador, que realiza um mapeamento entre os valores numéricos das variáveis de entrada do controlador para graus de compatibilidade com conceitos lingüísticos; a máquina de inferência, onde se efetua o processamento fuzzy propriamente dito, através de estratégias de “raciocínio aproximado”, baseadas em operadores da lógica fuzzy; a base de regras, que consiste de uma coleção de regras lingüísticas do tipo “se condição, então ação”; e o defuzzyficador, que transforma o conceito lingüístico, obtido pelo procedimento de inferência, em um valor numérico bem definido, o qual é utilizado como a saída efetiva do controlador fuzzy. E por fim, são apresentados os detalhes das estratégias de controladores fuzzy, aplicados ao conversor estático interligado ao rotor do DFIG, que correspondem a controladores supervisórios fuzzy e PI’s fuzzy.

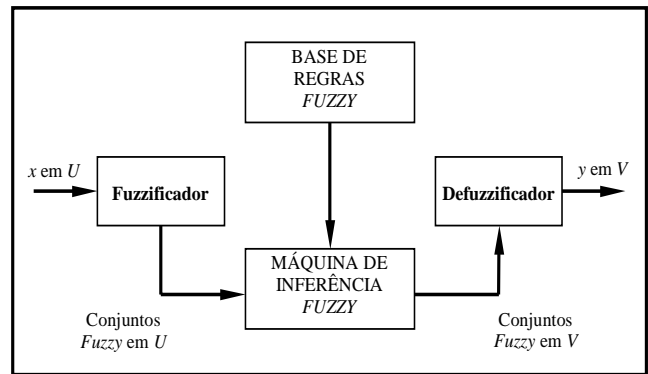


Figura 3: Diagrama de Blocos da Arquitetura de um Controlador Fuzzy Típico

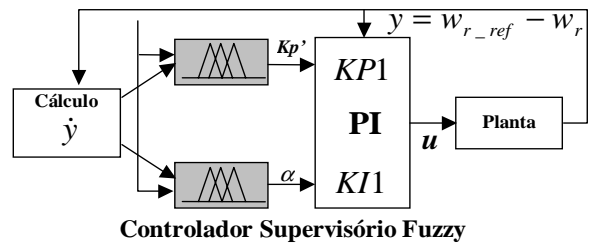


Figura 4: Controle supervisório fuzzy para o controle da velocidade do rotor

### 5.1 Controladores Supervisórios Fuzzy

Foram implementados três controladores supervisórios PI’s fuzzy, cujos parâmetros  $KP1$ ,  $KI1$ ,  $KP2$ ,  $KI2$ ,  $KP3$  e  $KI3$  dos controladores PI’s do DFIG, mostrados na figura 2, foram ajustados a cada instante de amostragem pelos sistemas fuzzy, responsáveis por gerar os novos valores dos parâmetros dos controladores. Estes ajustes são realizados de acordo com os novos valores dos desvios das entradas e das derivadas das entradas. O esquema para os controladores supervisórios PI’s fuzzy do DFIG é apresentado nas figuras 4 a 6.

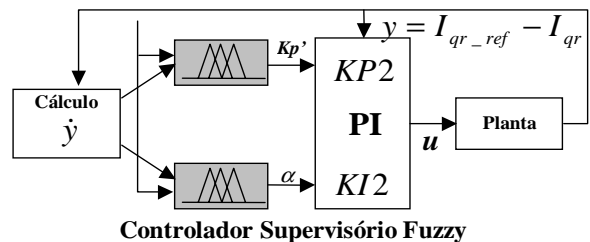


Figura 5: Controle supervisório fuzzy para o controle da corrente do rotor ao longo do eixo q

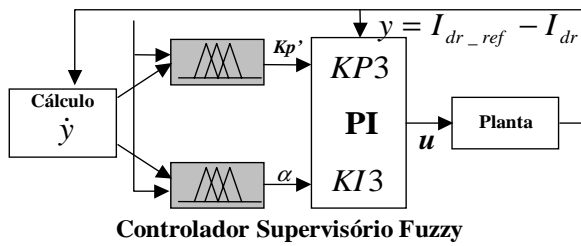


Figura 6: Controle supervisorio fuzzy para o controle da corrente do rotor ao longo do eixo d

O controlador supervisorio é do tipo “gain-scheduling” representado por sistemas fuzzy que determinam os valores dos parâmetros denominados de  $k_p$  e  $\alpha$ . A variável fuzzy  $k_p$ , normalizada entre 0 e 1 é utilizada para se obter o ganho proporcional  $KP$ , do controlador PI. Por outro lado, o ganho integral  $KI$  é obtido em função dos ganhos  $KP$  e da variável fuzzy  $\alpha$ , portanto, seu valor é dependente das possíveis variações que possam ocorrer no ganho proporcional.

É determinado um intervalo ( $KP_{min}, KP_{max}$ ) para o ganho proporcional. Por conveniência,  $KP$  é normalizado para o valor entre 0 e 1 pela seguinte transformação linear (Zhao et al, 1993):

$$KP = (KP_{max} - KP_{min})k'_p + KP_{min} \quad (11)$$

Assume-se que o ganho integral é determinado por:

$$KI = \frac{KP}{\alpha} \quad (12)$$

Em seguida, determina-se o intervalo para os ganhos proporcional e integral. Para concluir o projeto do controlador supervisorio fuzzy resta então somente especificar as funções de pertinência para os conjuntos fuzzy associados às variáveis de operação. Em um sistema fuzzy, as funções de pertinência governam a intensidade com que cada controlador infere na região de operação. As funções de pertinências foram definidas utilizando-se formas triangulares e trapezoidais, que têm sido uma solução padrão, conforme mostrado nas figuras 4 a 9 a seguir, sendo que o universo de discurso para cada variável foi normalizado para valores distintos de acordo com o comportamento das variáveis, observadas durante a simulação, e por fim foram utilizados fuzzyficadores singleton e defuzzyficadores média dos centros (Wang, 1997).

Na figura 7 são mostradas as funções de pertinência que correspondem às entradas dos controladores com ganhos  $KP1$  e  $KI1$ . Os universos de discurso das variáveis desvio

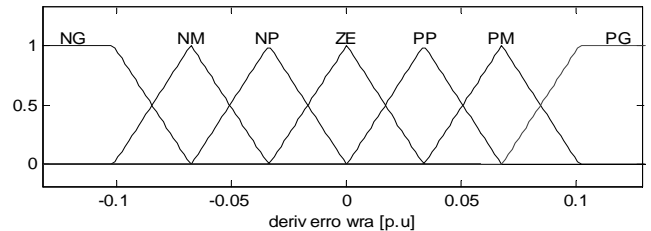
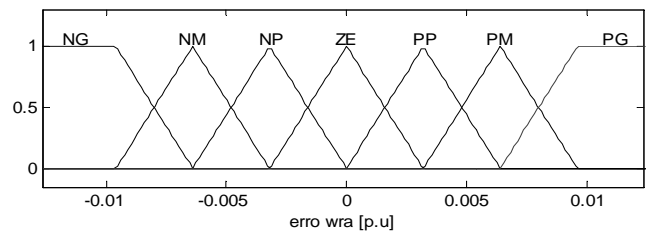


Figura 7: Funções de pertinências para o desvio e a derivada do desvio da velocidade do rotor

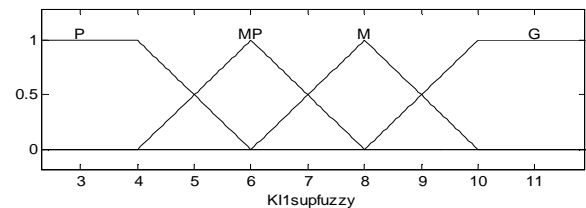
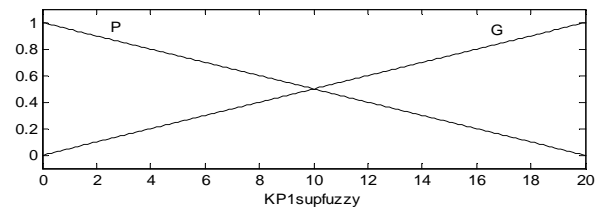


Figura 8: Funções de pertinências dos ganhos  $KP1$  e  $KI1$

e derivada do desvio de velocidade foram particionados utilizando 7 conjuntos fuzzy cada, denominados NG, NM, NP, ZE, PP, PM e PG, que significam, respectivamente, negativo grande, negativo médio, negativo pequeno, zero, positivo pequeno, positivo médio e positivo grande. As funções de pertinências dos ganhos dos  $KP1$  e  $KI1$  são mostradas na figura 8. Esses ganhos correspondem às saídas dos sistemas fuzzy, representadas pelas seguintes variáveis lingüísticas: G e P, que significam grande e pequeno, e P, PM, M e G, que correspondem a, pequeno, positivo médio, médio e grande.

Na Figura 9 a seguir, são representadas as funções de pertinência das entradas do controlador com ganhos  $KP2$  e  $KI2$ . As variáveis lingüísticas são representadas também pelo particionamento de 7 conjuntos fuzzy, que correspondem ao desvio e derivada do desvio da corrente do rotor ao longo do eixo q.

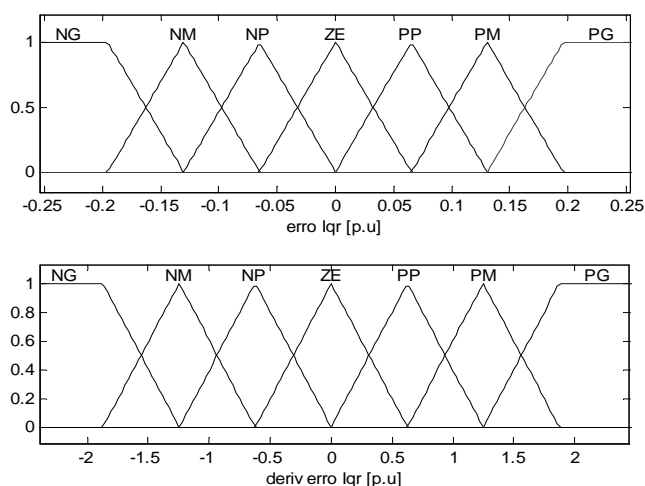


Figura 9: Funções de pertinências para o desvio e a derivada do desvio da corrente do rotor do eixo q

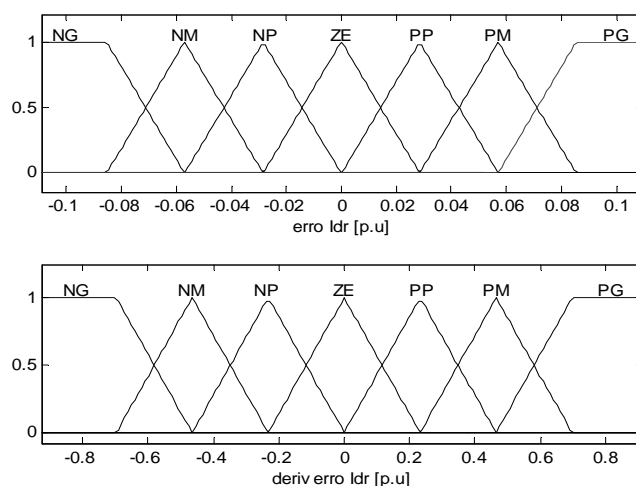


Figura 11: Funções de pertinências para o desvio e a derivada do desvio da corrente do rotor do eixo d

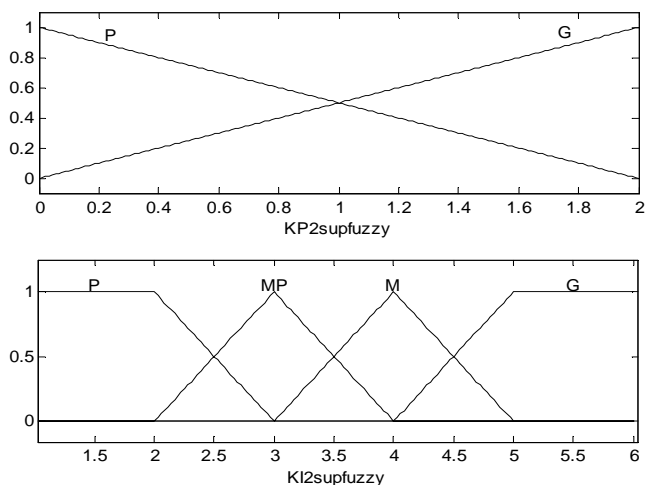


Figura 10: Funções de pertinências dos ganhos  $KP2$  e  $KI2$

Os ganhos  $KP2$  e  $KI2$  correspondem às saídas do controlador supervisor fuzzy. Suas funções de pertinências são mostradas na Figura 10. Os universos de discurso dos ganhos  $KP2$  e  $KI2$  foram particionados, utilizando 2 e 4 conjuntos fuzzy, respectivamente.

São mostradas na figura 11 as funções de pertinência que correspondem às entradas do controlador com ganhos  $KP3$  e  $KI3$ . Os universos de discurso das variáveis desvio e derivada do desvio da corrente do rotor ao longo do eixo d, foram particionados utilizando 7 conjuntos fuzzy cada. Finalmente, as funções de pertinências dos ganhos  $KP3$  e  $KI3$  são mostradas na Figura 12. Esses ganhos são representados pelas seguintes variáveis linguísticas: G e P, para o ganho  $KP3$  e P, PM, M e G, para o ganho  $KI3$ .

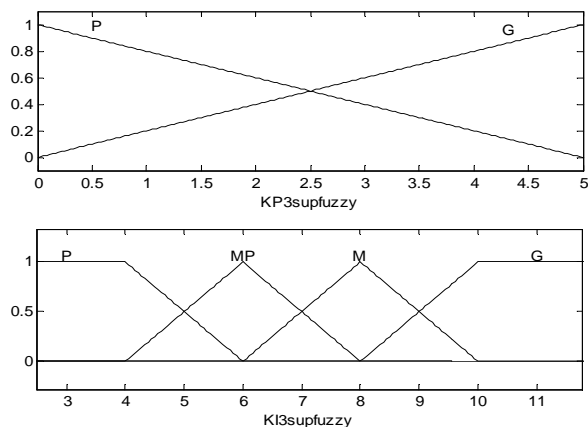


Figura 12: Funções de pertinências dos ganhos  $KP3$  e  $KI3$

A seguir, são apresentadas as bases de regras empregadas neste artigo para os controladores supervisor fuzzy (Wang, 1997). As bases de regras dos supervisor fuzzy das figuras 13 e 14 são compostas por 49 regras qualitativas cada, que executam o gerenciamento de todo o sistema fuzzy.

## 5.2 Controladores PI's Fuzzy

Foram implementados para este esquema de controle três reguladores PI's fuzzy, que recebem como sinal de entrada os desvios e as derivadas calculadas dos desvios das variáveis de controle do DFIG, mostradas na figura 2. A saída de cada sistema fuzzy utilizado, corresponde ao sinal de controle que atuará na planta. O esquema para o controlador fuzzy é apresentado nas figura 15 a 17.

Foram definidas também para esta estratégia de controle as

		$\dot{y}$						
		NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
y	NG	G	G	G	G	G	G	G
	NM	P	G	G	G	G	G	P
	NP	P	P	G	G	G	P	P
	ZE	P	P	P	G	P	P	P
	PP	P	P	G	G	G	P	P
	PM	P	G	G	G	G	G	P
	PG	G	G	G	G	G	G	G

Figura 13: Base de regras para o ganho  $k_p$

		$\dot{y}$						
		NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
y	NG	P	P	P	P	P	P	P
	NM	PM	PM	P	P	P	PM	PM
	NP	M	PM	PM	P	PM	PM	M
	ZE	G	M	PM	PM	PM	M	G
	PP	M	PM	PM	P	PM	PM	M
	PM	PM	PM	P	P	P	PM	PM
	PG	P	P	P	P	P	P	P

Figura 14: Base de regras para o ganho  $\alpha$ .

funções de pertinências, utilizando-se formas triangulares e trapezoidais, conforme apresentado nas figuras 18 a 23. O universo de discurso para as variáveis utilizadas na estratégia foi normalizado para valores distintos, de acordo com o comportamento das variáveis observadas durante o processo de simulação. Nota-se que os universos de discurso estão no intervalo  $[-1,1]$ . Isto é muito adotado no sentido de normalizar as variáveis. Portanto, os ganhos fuzzy devem ser escolhidos de forma que os valores máximos da entrada do controlador fuzzy não ultrapassem os extremos máximo e mínimo do universo de discurso.

Os universos de discurso das variáveis desvio e derivada do desvio de velocidade do rotor do DFIG foram particionados em 7 conjuntos fuzzy rotulados de: NG, NM, NP, ZE, PP, PM e PG, que significam, respectivamente, negativo grande,

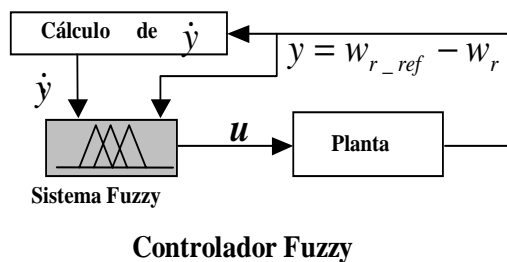


Figura 15: Controlador PI fuzzy para controle da velocidade do rotor

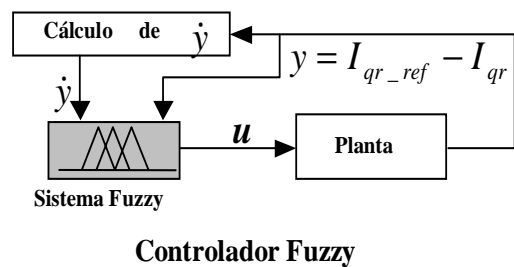


Figura 16: Controlador PI fuzzy para controle da corrente do rotor ao longo do eixo q

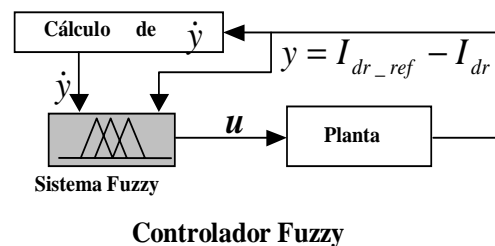


Figura 17: Controlador PI fuzzy para controle da corrente do rotor ao longo do eixo d

negativo médio, negativo pequeno, zero, positivo pequeno, positivo médio e positivo grande, como identificado na figura 18. Para simplificar os cálculos e minimizar o tempo de execução do algoritmo, foram utilizadas funções de pertinência nos formatos triangular e trapezoidal.

Na figura 19, são apresentadas as funções de pertinência que correspondem à saída do controlador com ganhos  $KP1eKI1$ . Os universos de discurso das variáveis desvio e derivada do desvio de velocidade foram particionados utilizando também 7 conjuntos fuzzy cada, rotulados de: NG, NM, NP, ZE, PP, PM e PG.

Na Figura 20 são representadas as funções de pertinência das entradas do controlador com ganhos  $KP2eKI2$ . As variáveis lingüísticas das entradas são representadas também pelo particionamento de 7 conjuntos fuzzy cada, sendo que as mesmas correspondem ao desvio e derivada do desvio da corrente do rotor ao longo do eixo q.

A saída do controlador com ganhos  $KP2eKI2$ , corresponde à derivada do desvio da tensão do rotor ao longo do eixo q na figura 2, que somada à tensão do rotor do passo de integração anterior resultará na tensão do rotor ao longo do eixo q do passo atual, a qual será realimentada nas equações dinâmicas do DFIG. Suas funções de pertinências são mostradas na Figura 21.

Na figura 22 são apresentadas as funções de pertinência que correspondem às entradas do controlador com ganhos  $KP3$

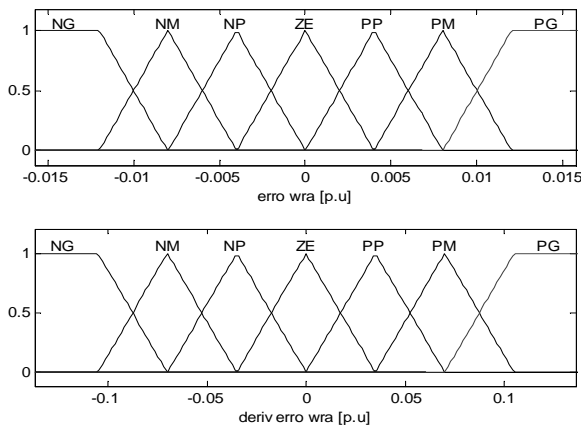


Figura 18: Funções de pertinências para o desvio e a derivada do desvio da velocidade do rotor

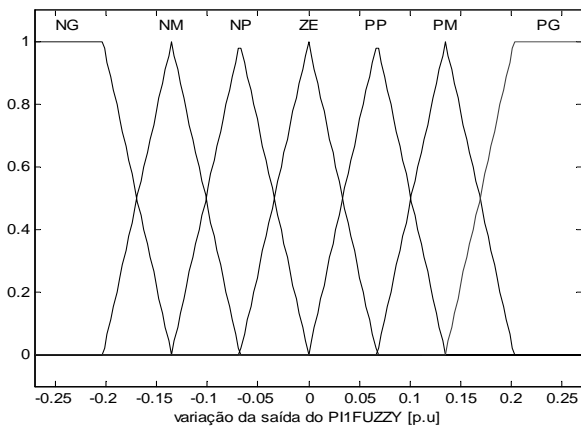


Figura 19: Função de pertinência para as saídas do controlador fuzzy com ganhos  $KP1$  e  $KI1$ .

e  $KI3$ . Os universos de discurso das variáveis desvio e derivada do desvio da corrente do rotor ao longo do eixo d foram particionados utilizando 7 conjuntos fuzzy cada. Por fim, a saída do controlador na figura 2, com ganhos  $KP3$  e  $KI3$ , corresponde à derivada do desvio da tensão do rotor ao longo do eixo d, que adicionada a tensão do rotor da amostra anterior, irá resultar na tensão do rotor ao longo do eixo d, que também corresponde a saída do regulador de tensão ou potência reativa do DFIG. Suas funções de pertinências são mostradas na figura 23.

Os controladores do tipo PI fuzzy incremental aplicados aos reguladores de velocidade e tensão do DFIG, apresentam uma base de regras bidimensional, utilizando-se 7 funções de pertinência para cada entrada e saída, ou seja, a base de regras bidimensional (7X7) contém 49 regras. A seguir, é mostrada a base de regras empregada no projeto dos controladores PI's fuzzy na figura 19 (Miranda, 2000).

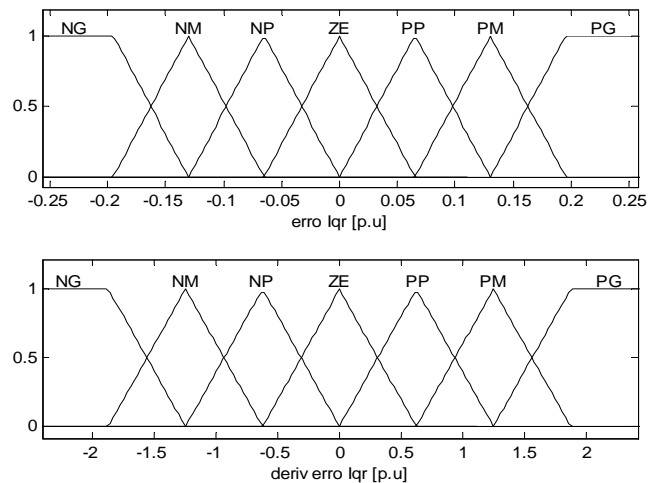


Figura 20: Funções de pertinências para o desvio e a derivada do desvio da corrente do rotor do eixo q

## 6 SISTEMA DE POTÊNCIA

A rede elétrica real adotada nas simulações pertence à CO-SERN, concessionária de distribuição de energia elétrica, a qual opera no estado do Rio Grande do Norte, no Brasil. Nas presentes simulações foi utilizada uma de suas redes, conhecida como Rede Elétrica de Açu. Para este sistema, é planejada a integração de um parque eólico na barra 2, onde é apresentado um equivalente de aerogeradores de 20 MW, como ilustrado na figura 25. Além disso, o sistema de geração apresenta um gerador equivalente síncrono, para representar o sistema elétrico conectado à barra 1. A máquina primária equivalente do gerador síncrono apresenta regulador de velocidade com ação integral e proporcional (Kundur, 1994).

## 7 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para as simulações dinâmicas realizadas, a falta corresponde a um curto-circuito trifásico, ocorrido próximo à barra 16, na rede elétrica de Açu-RN, no instante  $t=1s$ , com duração de 100ms. As figuras 26 a 29 apresentam o comportamento da corrente do rotor, velocidade do rotor, tensão e potência ativa do DFIG, respectivamente, nas situações em que os controladores do gerador são compostos por PI's a parâmetros fixos, supervisórios fuzzy e PI's fuzzy, respectivamente.

Na figura 26 é mostrada a corrente do rotor do DFIG, e pode ser observado que o pico da corrente rotórica é diminuído em aproximadamente 5% e 9%, quando do uso de controladores supervisórios fuzzy e PI's fuzzy, respectivamente, em relação aos controladores PI's a parâmetros fixos, o que representa uma maior confiabilidade da operação contínua dos conversores, podendo evitar, em algumas situações, a ação do



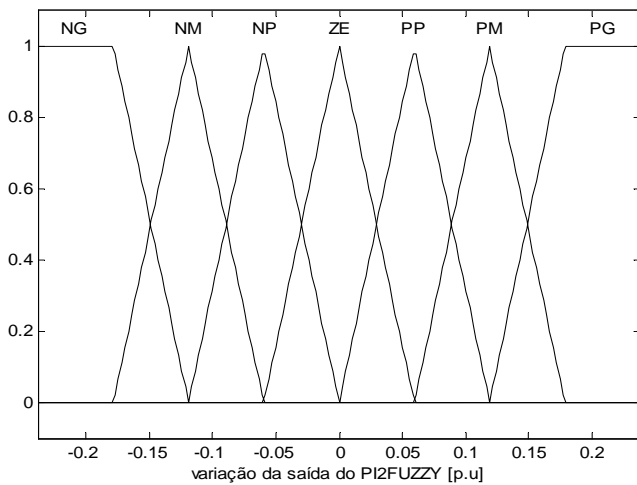


Figura 21: Função de pertinência para as saídas do controlador fuzzy com ganhos KP2 e KI2.

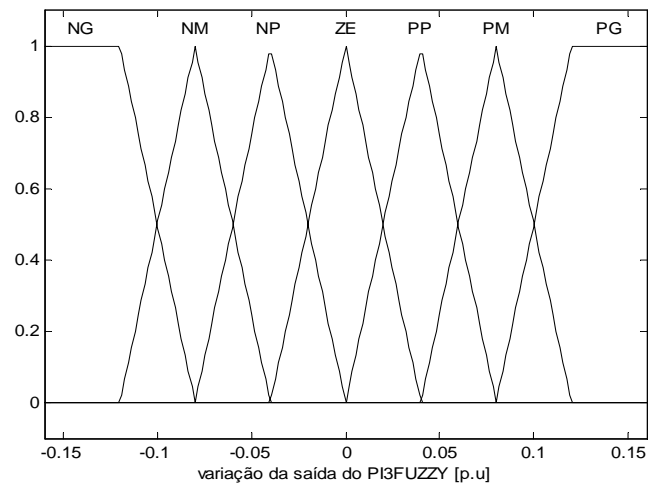


Figura 23: Função de pertinência para as saídas do controlador fuzzy com ganhos KP3 e KI3.

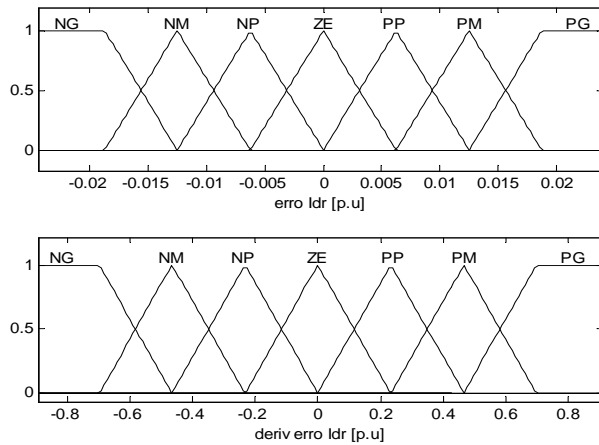


Figura 22: Funções de pertinências para o desvio e a derivada do desvio da corrente do rotor do eixo d

crow-bar, mantendo o conversor em operação durante a falta, e reduzindo as chances de desativação das malhas de controle, e como consequência, garantindo uma maior margem de estabilidade transitória do sistema.

É observado na figura 27 que os controladores inteligentes implementados permitem também que a velocidade do rotor apresente menores oscilações, entrando em regime permanente mais rapidamente, com menor sobre-sinal, em relação aos resultados com reguladores PI fixos.

A figura 28 apresenta o comportamento dinâmico da tensão. É identificado que sem o uso dos controladores inteligentes, ou seja, apenas com controladores fixos, o sistema apresenta sobresinal mais elevado, e resposta mais lenta. Os controladores fuzzy apresentam desempenhos melhores. A ação

		$\dot{y}$						
		NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
$y$	NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZE
	NM	NG	NG	NM	NM	NP	ZE	PP
	NP	NG	NM	NP	NP	ZE	PP	PM
	ZE	NM	NM	NP	ZE	PP	PM	PM
	PP	NM	NP	ZE	PP	PP	PM	PG
	PM	NP	ZE	PP	PM	PM	PG	PG
	PG	ZE	PP	PM	PM	PG	PG	PG

Figura 24: Base de Regras para os Controladores PI's Fuzzy.

dos controladores fuzzy foi capaz não apenas de reduzir o sobre-sinal, mas também diminuir o tempo de acomodação, melhorando o desempenho de resposta dinâmica da tensão.

Na figura 29, o comportamento da potência ativa do DFIG apresenta claramente menores oscilações, como consequência menor sobre-sinal e tempo de acomodação, quando são utilizados controladores baseados em lógica fuzzy, isso se traduz em melhoria do desempenho transitório para o sistema quando os controladores inteligentes baseados em sistemas fuzzy desenvolvidos forem utilizados.

Nas Figuras 30 e 31 são apresentadas as variações dos ganhos proporcionais (KP1, KP2 e KP3) e integrais (KI1, KI2 e KI3) dos controladores PI's das malhas de controle do DFIG, que foram determinados pelo esquema de controle supervisionado fuzzy.

É observado que durante a ocorrência do curto-circuito, os parâmetros dos controladores do DFIG sofrem variações baseadas nas novas metodologias propostas de controle supervisionado inteligente, com o objetivo de calcular os ganhos

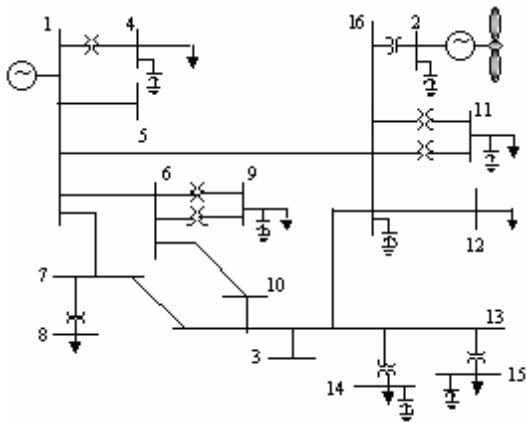


Figura 25: Rede Elétrica de Açú-RN

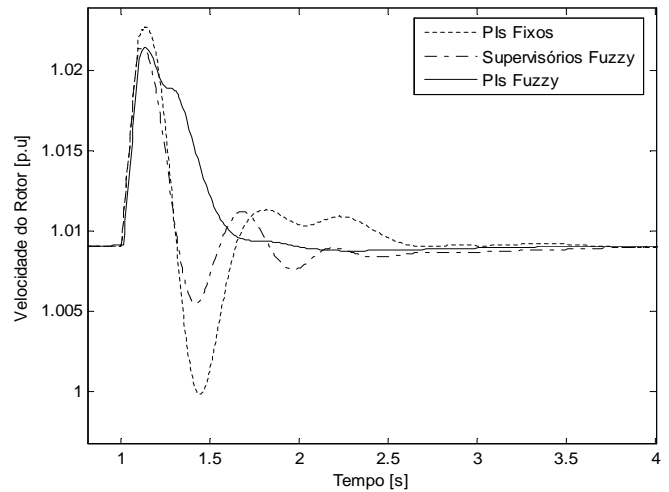


Figura 27: Velocidade do Rotor

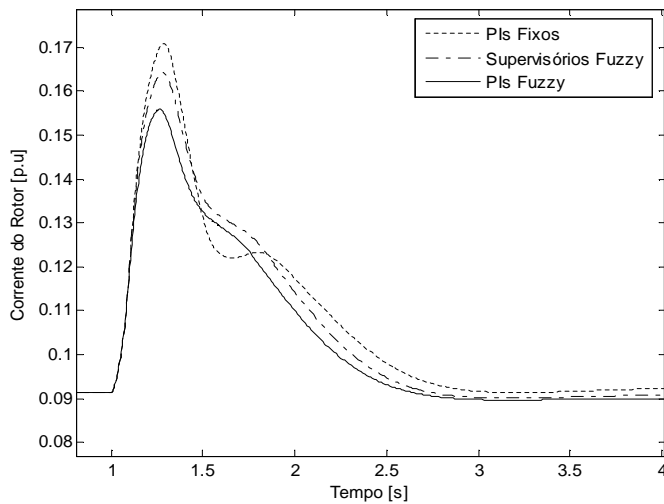


Figura 26: Corrente do Rotor

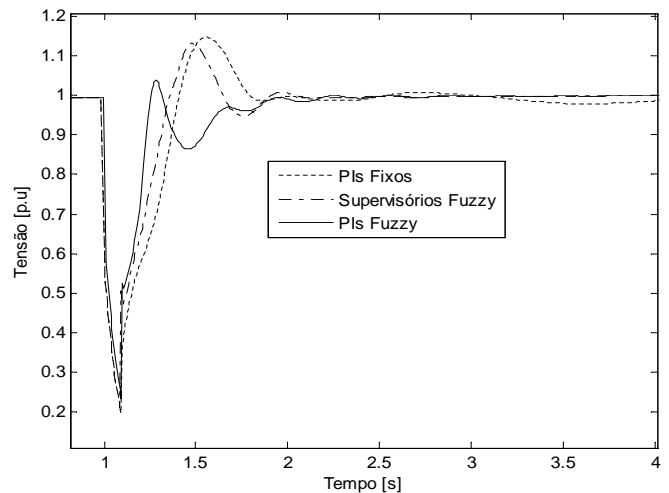


Figura 28: Tensão

ótimos. Estas variações dos ganhos dos controladores supervisórios fuzzy ocorrem dentro de uma faixa pequena, em relação ao valor de regime permanente, demonstrando a factibilidade de implementação real.

## 8 CONCLUSÕES

A implementação de estratégias de controle fuzzy aplicadas ao conversor interligado ao rotor do DFIG, apresentada neste trabalho, corresponde a uma solução de engenharia inovadora, que resulta na melhoria do desempenho transitório do sistema eólico, quando comparado às estratégias de controle convencional, a parâmetros fixos, que apresentam um pobre desempenho quando o sistema é submetido as grandes perturbações, como um curto-circuito na rede elétrica. Dentro desta filosofia, foram implementados três controladores supervisórios fuzzy e três PI's fuzzy nas malhas de controle do

DFIG, sendo os desempenhos dos mesmos comparados com os dos controladores PI a parâmetros fixos. Os resultados mostraram claramente que as novas estratégias propostas, baseadas em regras qualitativas derivadas do conhecimento especialista sobre a dinâmica do DFIG, reduzem o pico da corrente do rotor durante o transitório, além de aumentar a margem de estabilidade transitória, diminuindo os impactos sobre o sistema elétrico, o que representa um ganho adicional desenvolvido neste artigo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a COSERN – Companhia Energética do Rio Grande do Norte pela permissão do uso dos parâmetros da rede elétrica de Açú-RN.

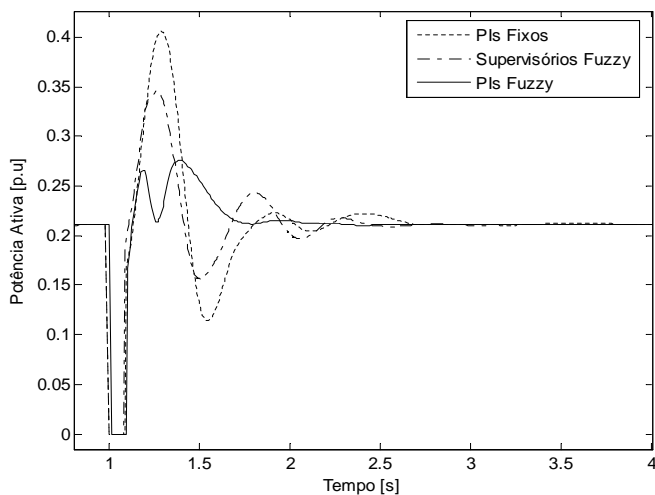


Figura 29: Potência Ativa

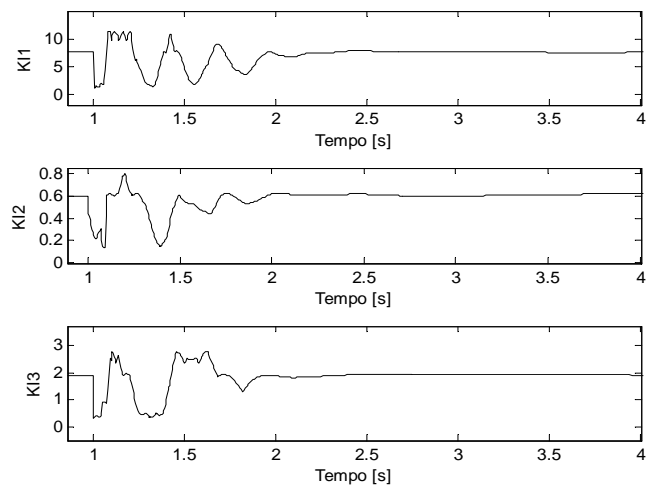


Figura 31: Ganhos KI1, KI2 e KI3

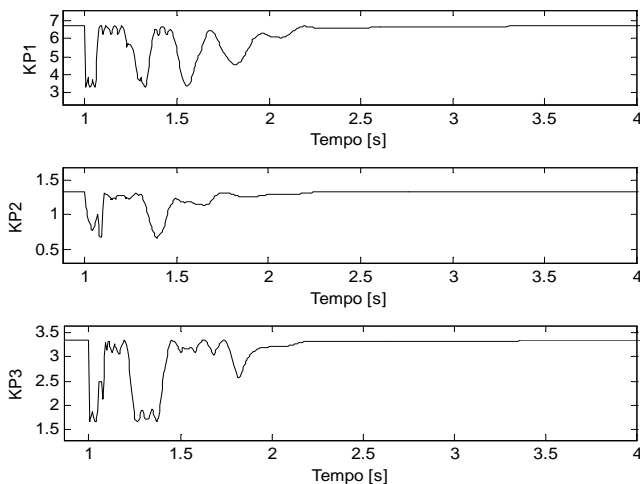


Figura 30: Ganhos KP1, KP2 e KP3

## REFERÊNCIAS

- Almeida, R.G., Peças Lopes, J.A., Barreiros, J.A.L., (2004). Improving Power System Dynamic Behavior Through Doubly Fed Induction Machines Controlled by Static Converter Using Fuzzy Control. *IEEE Transactions Power System*. Vol. 19. pp1942-1950.
- Heier, S., (1998). Grid Integration of Wind energy Conversion Systems. Chicester, UK: John Wiley & Sons Ltd., 1998.
- Holdsworth, L.; Wu, X.; Jenkins, N., (2002). Dynamic and Steady-State Modelling of the Doubly-Fed Induction Machine (DFIM) for Wind Turbine Applications. *Internal MCEE UMIST report on*. (Jan).

Kundur, P., (1994). Power System Stability and Control. USA. *EPRI – Electric Power Research Institute*. McGraw-Hill.

Morren, J., Haan, S.W.H., (2005). Ridethrough of Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generator During a Voltage Dip. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol 20, pp. 435-441.

Miranda, V. (2000). Uma abordagem Sobre Redes Neurais, Lógica Difusa e Algoritmos Evolucionários. *Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal. 2000.

Nunes, M.V.A., (2003). Avaliação do Comportamento de Aerogeradores de Velocidade Fixa e Variável Integrados em Redes Elétricas Fracas. *Tese de Doutorado*. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina.

Nunes, M.V.A., Zurn, H.H., Bezerra, U.H, Peças Lopes, J. A., Almeida, R.G., (2003). Influence of the Variable Speed Wind Generators in Transient Stability Margin of the Conventional Generators Integrated in Electrical Grids. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol.19(4), pp.692-701.

Nunes, M.V.A., Vieira, J.P.A., Bezerra, U.H., Lopes, J.A.P., (2005). New Mathematical Models to Represent Variable Speed Wind Generation Systems in Transient Stability Studies, *15th Power Systems Computation Conference (PSCC'05)*, Liège, Belgium, 2005.

Slootweg, J.G., (2003). Wind Power Modelling and Impact on Power System Dynamic. *Ph.D. Dissertation*. Tech. Univ. Delft. The Netherlands.

Slootweg, J.G., Polinder, H.; Kling, W.L.; (2003). Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. v. no , pp.

Vieira, J.P.A., Nunes, M.V.A., Bezerra, U.H., Nascimento, A.C., Silva, S.R., Medeiros Jr., M.F., Oliveira, J.T., Ferreira, S.F., (2006). Controlability Analysis of Connected to a Real Electric Grid. *VI INDUSCON 2006*, Recife. Brasil.

Wang, L.X., (1997). *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Prentice Hall International. Inc.

Zhao, Z.Y., Tomizuka, M., Isaka, S., (1993). Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybern.* vol. 23, no 5, pp.1392-1398.