

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA ATRAVÉS DE CONTROLE FUZZY

M. Godoy Simões, N.N. Franceschetti, Bimal K. Bose

Universidade de São Paulo
Av. Prof. Mello Moraes, 2231
05508-900 São Paulo/SP
*The University of Tennessee
Knoxville, TN 37996 / USA

Resumo: Este trabalho é o resultado de uma aplicação de lógica e controle *fuzzy* visando melhorias no desempenho de um sistema de geração de energia eólica, em velocidade variável, para que seja transferida potência máxima para a rede elétrica, capturada por uma turbina eólica de eixo vertical. Há um gerador de indução que alimenta um conversor PWM duplo, com *hardware* projetado a partir de placas processadoras DSP TMS320C30, módulos IGBT Intellimod e um ASIC PWM Hanning. O *software* de controle em tempo real foi implementado em linguagem C, possibilitando a avaliação dos algoritmos propostos em um sistema experimental de 3,5 kW. O controle é realizado através de três controladores *fuzzy*, os quais têm a função de rastrear o ponto de operação para transferência de potência máxima, otimizar o fluxo rotórico do gerador de indução e controlar a malha de velocidade robustamente contra pulsações de torque – características de turbinas de eixo vertical – e rajadas de vento. O artigo também apresenta detalhadamente as estratégias de controle vetorial utilizadas, os princípios de otimização de sistemas através de controle *fuzzy*, incluindo seus detalhes de implementação, referentes às regras e funções de pertinência utilizadas.

Abstract - This work is an application of fuzzy logic control in the improvement of a variable speed wind generation system performance, so as to transfer the maximum captured wind power to the utility mains. There is an induction generator feeding a double PWM converter, with hardware based on DSP TMS320C30 processor boards, Intellimod IGBT modules and a PWM Hanning ASIC. The real time software control was written in C language, allowing the evaluation of the proposed algorithms in an experimental 3,5 kW setup. The control is made up of three fuzzy controllers, which have the functions of maximum power point tracking, rotor flux induction generator optimization and robust speed loop control to torque pulsations and wind gusts. The paper presents in details the required vector control strategies, the fuzzy optimization principles and their implementation aspects concerning the rules and membership functions.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento industrial e o desenvolvimento sustentado brasileiro, necessitam do aumento da capacidade energética, a qual deve ocorrer com o mínimo de impactos ambientais, com o máximo de descentralização e flexibilidade de instalação, ser não poluente, e modularizada através da possibilidade de paralelização de sistemas. Esforços governamentais estão incentivando a utilização de energia gerada de fontes alternativas: solar, eólica e biomassa, através da promoção de encontros com grupos de trabalho, oriundos de universidades, centros de pesquisa e de diversas empresas. O potencial eólico brasileiro tem sido mapeado por esses grupos de trabalho, demonstrando a possibilidade de investimentos em sistemas de geração de energia pelo vento em diversas áreas das regiões norte, nordeste e na faixa litorânea (GTEE, 1997). Em escala mundial os sistemas eólicos têm encontrado um grande mercado, também devido à evolução tecnológica dos semicondutores de potência e dos sistemas eletrônicos dedicados, que possibilitam acionamento em frequência variável e aplicação de sofisticados algoritmos de controle.

Dentre os diversos projetos de turbinas, há duas classes gerais: (1) turbinas de eixo-horizantal, similares aos moinhos holandeses, onde o rotor do gerador gira ao redor de um eixo horizontal, e (2) as turbinas de eixo-vertical, cuja configuração mais promissora é a chamada “Darrieus”, ilustrada na Fig. 1. Turbinas de eixo vertical (TEV) possibilitam vantagens significativas:

- Não necessitam ser orientadas conforme a direção do vento, ou seja são omnidirecionais;
- Não necessitam de controle do ângulo de ataque nas pás, facilitando o processo de fabricação;
- O sistema mecânico de conexão com o gerador é localizado no solo, facilitando os serviços de manutenção.

Todavia, as TEVs não se tornaram de uso generalizado, devido a outras dificuldades: (1) a turbina “Darrieus” deve inicialmente ser movida em modo de motorização, até que o vento impulse as lâminas, assim o inversor eletrônico deve ser capaz de operar em quatro quadrantes, (2) as lâminas são submetidas a forças alternadas, causando fadiga no material e, (3) tais forças provocam pulsações de torque que podem causar

Artigo submetido em 16/10/97

1a. Revisão em 03/02/98; 2a. Revisão em 14/08/98;

Aceito sob recomendação da Eda. Consa. Profa.Dra Sandra Aparecida Sandri

instabilidade no sistema de controle de velocidade. Há diversos avanços tecnológicos nos últimos anos que podem trazer as TEVs à atenção novamente: novos materiais para a fabricação das lâminas, dentre eles o CFRP (polímero reforçado de fibra de carbono) e o GFRP (polímero reforçado de fibra de vidro), além de fibras de poliéster especializadas em redução de fadiga mecânica. Atualmente, os sistemas de eletrônica de potência são muito mais eficientes, permitindo a variação suave da velocidade do gerador. Há sistemas microprocessados, ou baseados em processadores digitais de sinais (DSP) que possibilitam a implementação de técnicas modernas de controle, que podem ser utilizadas para a otimização e melhoria de desempenho do sistema de controle.

Esse trabalho mostra uma implementação de algoritmos de controle *fuzzy*, testada em laboratório, para o comando de turbinas eólicas. Apesar de já terem sido relatados trabalhos a respeito desse sistema (Simões *et alii*, 1997a; Simões *et alii*, 1997), esse artigo apresenta detalhes não cobertos anteriormente, mostrando uma discussão da metodologia que levou à construção das regras de otimização dos algoritmos *fuzzy*, além da descrição da estratégia de controle vetorial direto para o sistema de interconexão à rede elétrica trifásica.

2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A Fig. 2 apresenta o diagrama de blocos do controle do sistema, um gerador de indução alimenta dois inversores: o inversor da máquina de indução, e o inversor da rede trifásica, ambos comandados em modulação senoidal de largura de pulso (SPWM) e ligados por um elo CC. No artigo passaremos a chamar o sistema como um todo por conversor PWM duplo. O inversor da máquina absorve a potência reativa do gerador de indução, enquanto que na rede trifásica a potência é sempre ativa, devido ao controle de fator de potência unitário. O inversor da máquina pode operar em modo de motorização, durante a inicialização da turbina, e em modo de regeneração durante a produção de energia pelo vento, fluindo potência

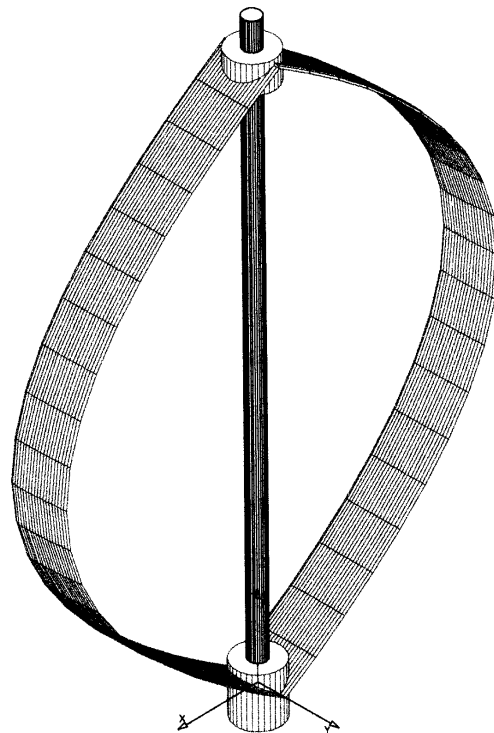


Fig. 1: Turbina de eixo vertical (TEV) “Darrieus

instantânea nos quatro quadrantes, sempre operando em controle vetorial indireto (CVI) (Bose, 1986). O inversor conectado à rede trifásica permite que o capacitor do elo CC se carregue, através dos diodos existentes em paralelo com os semicondutores de potência, chamados por IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), a potência pode fluir da rede trifásica para a máquina de indução, durante a motorização, e após o capacitor do elo CC ser controlado a uma tensão de operação mais elevada, o sistema pode efetivamente gerar potência ao sistema elétrico. O inversor da rede trifásica opera em controle vetorial direto, onde os sinais de geração do vetor unitário são

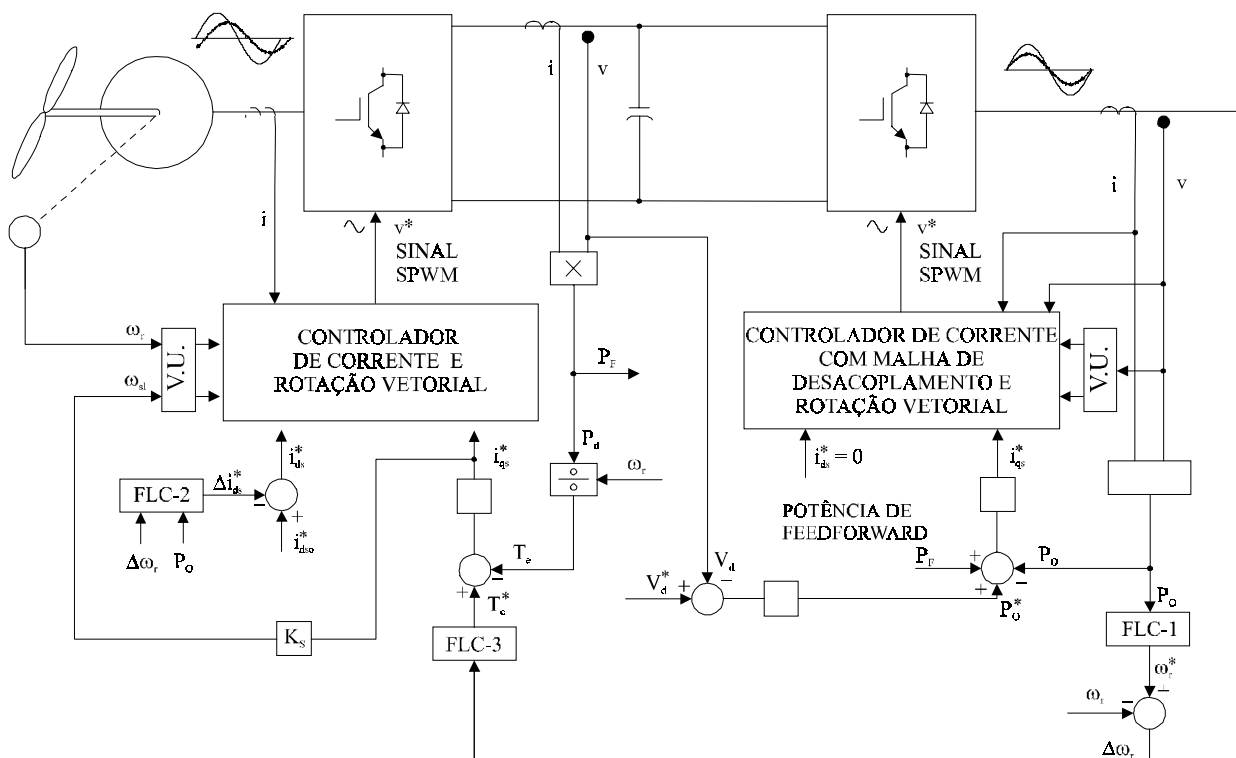


Fig. 2: Diagrama de blocos do sistema de geração eólica

sintetizados de forma a se impor tensões e correntes em fase, ou seja fator de potência unitário, já que a distorção harmônica é pequena, devido à operação SPWM em alta frequência. A técnica de controle vetorial é utilizada em ambos os inversores para se obter resposta transiente satisfatória à necessidade de robustez contra pulsações de torque, características de uma TEV. Há uma malha externa de controle e gerenciamento, constituída por três controladores *fuzzy* denominados por FLC-1, FLC-2, e FLC-3 que respectivamente são responsáveis por: busca de velocidade do gerador de indução otimizada para a velocidade de vento que está ocorrendo, diminuição da corrente de excitação do gerador de indução e conseqüente aumento no rendimento da máquina, e controle *fuzzy*-PI da malha de velocidade, robusto à pulsação de torque e rajadas de vento. A operação detalhada dos controladores *fuzzy* será abordada posteriormente. Observa-se na Fig. 2 que o controle da malha de velocidade, feito por FLC-3, recebe um valor de referência otimizado da rotação do gerador (ω_r^*), proveniente de FLC-1. O sinal de torque instantâneo (T_e^*) balanceia o torque de carga da turbina (T_c), onde uma malha interna contendo a potência instantânea no elo CC (P_d), dividida pelo valor da velocidade angular do gerador (ω_r), faz com que pulsações de torque da TEV provoquem uma modulação inversa do sinal de corrente (i_{qs}^*) responsável pelo comando do inversor da máquina de indução. A potência que flui no elo CC é alimentada em *feedforward* para o controle do inversor da rede trifásica (não mostrado na figura), de forma a melhorar a flutuação de tensão do elo CC. Há uma indutância (L_s) conectada entre as três fases do inversor e a rede trifásica, importante para estabilização do controlador de corrente do controle vetorial direto, a indutância foi selecionada de forma a impor que o índice de modulação máximo esteja dentro dos limites de largura de pulso mínima do IGBT (Zargari and Joss, 1995), conforme a equação (1).

$$2\pi f_s i_{qs} + \frac{v_{ac} + 0.5v_d}{L_s} < 2f_s v_m \quad (1)$$

onde:

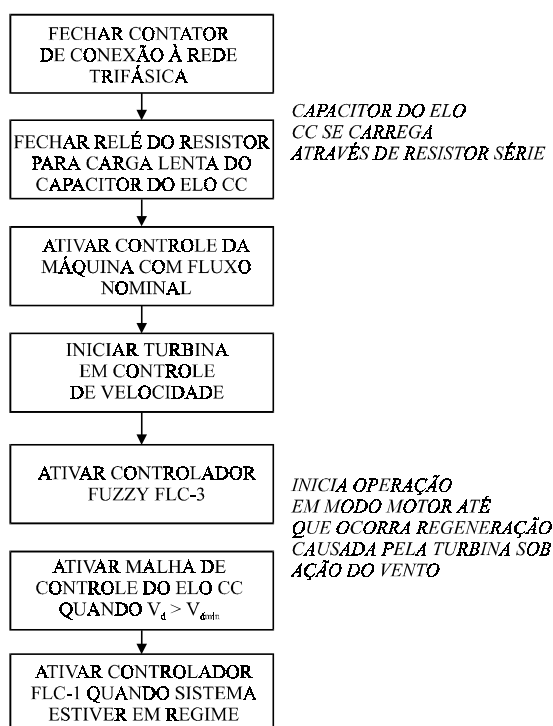


Fig. 3: Inicialização do sistema

L_s	=	indutância de conexão
v_{ac}	=	tensão de linha na rede trifásica
v_d	=	tensão do elo CC
f_s	=	frequência do PWM
v_m	=	amplitude da portadora triangular
i_{qs}	=	corrente ativa

Durante a inicialização do sistema conversor PWM duplo, os inversores estão individualmente desligados, isto é, todos os pulsos dos IGBTs estão desligados, e o capacitor do elo CC é inicialmente carregado através dos diodos em paralelo, que formam um retificador na linha trifásica. Para prevenir correntes elevadas, há uma resistência em série que limita a corrente de carga do capacitor. Quando o elo CC atingir 95% do valor final um relê eletromagnético conecta o sistema diretamente. A seguir o controle de malha da tensão do elo é habilitado, o gerador de indução é inicialmente excitado com a corrente de excitação (i_{ds}) nominal e a máquina de indução é posta a movimentar a turbina. O vento ao impulsionar as pás, faz com que a frequência de escorregamento se torne negativa, e a malha de controle automaticamente passa a impor torque negativo, com velocidade angular positiva, fazendo com que o capacitor no elo CC aumente de tensão devido à regeneração. Ao atingir o valor máximo, a malha de tensão do elo CC impõe que seja transferida potência para a rede trifásica, completando a inicialização do sistema, habilitando os controladores *fuzzy* para o gerenciamento e otimização do sistema; os passos de inicialização estão mostrados no fluxograma da Fig. 3.

2.1 Controle Vetorial do Conversor Duplo PWM

O inversor do gerador de indução utiliza controle vetorial indireto. O controle das correntes i_{ds} e i_{qs} faz com que o fluxo rotórico esteja alinhado com a corrente i_{ds} (Bose, 1986). Com controle vetorial não há problema de instabilidade devido à malha interna de controle de corrente, permitindo operação em quatro quadrantes, inclusive operação em velocidade nula. A frequência de operação do gerador de indução é controlada através do vetor unitário, gerado pela adição da velocidade da máquina (ω_r) com a frequência de escorregamento (ω_{sl}), em *feedforward*, conforme a Fig. 4. A frequência angular ω_e é integrada e o ângulo do vetor de fluxo rotórico é utilizado em uma tabela de seno/cosseno para a operação de rotação vetorial inversa, de acordo com as equações (2) e (3). O controlador de corrente PI gera as tensões de referência em quadratura v_{qs}^* e v_{ds}^* , e o circuito integrado Hanning PWM (Hanning, 1993) faz a operação de rotação vetorial, com o ângulo do fluxo rotórico, de forma a gerar os pulsos para os transistores IGBT.

$$i_{qs} = i_{qs}^s \cos \theta_e - i_{ds}^s \sin \theta_e \quad (2)$$

$$i_{ds} = i_{qs}^s \sin \theta_e + i_{ds}^s \cos \theta_e \quad (3)$$

O inversor conectado à rede elétrica utiliza uma estratégia de controle vetorial direto (CVD), onde uma resposta transitória rápida é importante para se controlar a tensão no elo CC e o fluxo de potência. O vetor unitário é gerado a partir das tensões da rede (Sukegawa *et alii*, 19??), como indicado no diagrama fasorial da Fig. 5, onde o vetor corrente I_s é mantido em fase com o vetor tensão V_s . Uma vez que a corrente (i_{ds}) é mantida nula, não há fluxo de potência reativa, a corrente da rede trifásica passa pela rotação vetorial inversa, e um controlador de corrente, com um desacoplamento *feedforward* mantém as correntes em fase com as tensões trifásicas, permitindo operação com fator de potência unitário. Se o inversor tiver margem para maior potência, o fator de potência

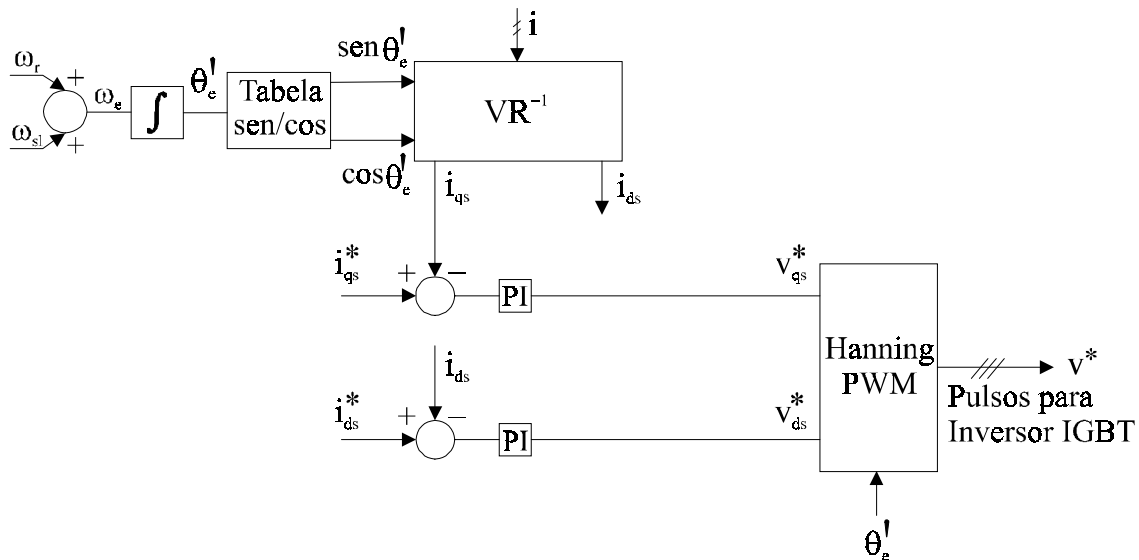


Fig. 4: Processamento de sinais do controle vetorial indireto (CVI) para o inversor do gerador de indução

pode também ser programado para se manter indutivo ou capacitivo, através do controle de i_{ds}^* . As equações utilizadas na estratégia de controle vetorial direto são:

$$v_{qs}^s = v_a \quad (4)$$

$$v_{ds}^s = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_c - v_b) \quad (5)$$

$$\cos \theta_e = \frac{v_{qs}^s}{\sqrt{(v_{qs}^s)^2 + (v_{ds}^s)^2}} \quad (6)$$

$$\sin \theta_e = \frac{v_{ds}^s}{\sqrt{(v_{qs}^s)^2 + (v_{ds}^s)^2}} \quad (7)$$

$$P_o = \frac{3}{2}(v_{qs}^s i_{qs}^s + v_{ds}^s i_{ds}^s) \quad (8)$$

$$\theta_e = \int \left(\frac{\Delta v_{qs}^s v_{ds}^s - \Delta v_{ds}^s v_{qs}^s}{(v_{qs}^s)^2 + (v_{ds}^s)^2} \right) \quad (9)$$

O diagrama de processamento de sinais para o controle vetorial direto do inversor da rede trifásica é dado na Fig. 6. Há uma rede de desacoplamento conectada aos controladores PI. Pode-se mostrar que a indutância série cria um efeito de acoplamento, ou seja, se i_{ds} é alterada, há uma queda de tensão ($\omega L i_{ds}$) no eixo-q e se i_{qs} é alterada, também é criada uma queda de tensão no eixo-d. Esse efeito cruzado pode ser cancelado pelos termos *feedforward* adicionais, $\omega L i_{ds}$ na malha de i_{qs} e $\omega L i_{qs}$ na malha de i_{ds} ($K = \omega L$). A malha de v_{qs} contém a força-contratraz instantânea da rede trifásica para melhorar o desempenho do controlador de corrente, porém a malha de v_{ds} não contém essa compensação pois a corrente reativa nesse projeto foi mantida nula. O controle vetorial para cada inversor responsabiliza-se em manter o sistema de acionamento estável e operante nos quatro quadrantes.

Para que ocorra o rastreamento de potência máxima da turbina há três controladores *fuzzy* com os seguintes objetivos:

1. Otimizar a eficiência aerodinâmica, ou seja a máxima transferência de potência para a rede trifásica;
2. Ajustar o melhor nível de fluxo no gerador de indução que otimize o rendimento do conjunto inversor + máquina;
3. Controlar a velocidade do gerador de forma robusta, contra turbulências e vórtices do vento, robusto ao torque oscilatório da turbina.

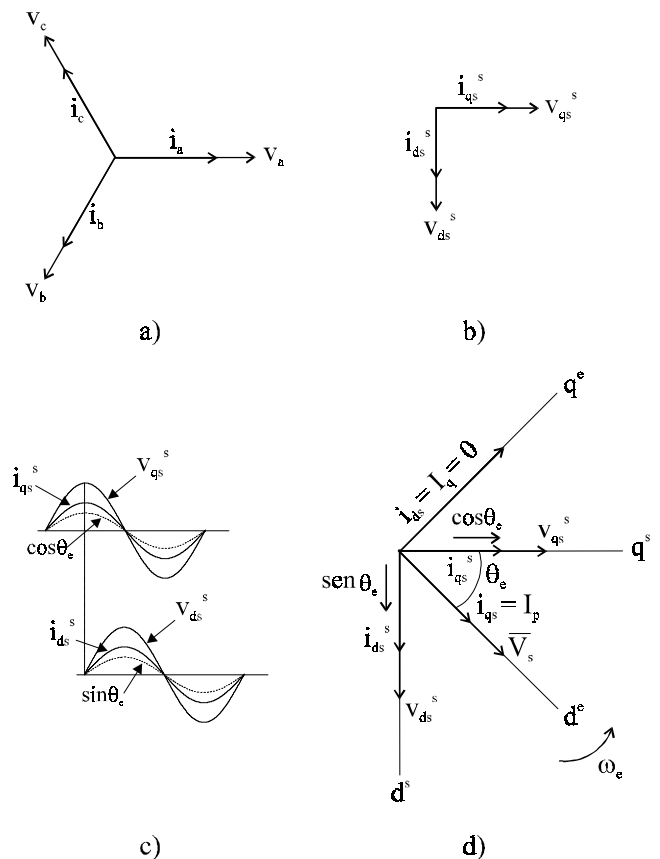


Fig. 5: Controle vetorial direto (CVD), (a) Fasor para as correntes trifásicas, (b) Fasor para as correntes e tensões bifásicas, após transformação 3Φ-2Φ, (c) Correntes e tensões bifásicas instantâneas, (d) Sinais no sistema de referência, através da geração do vetor unitário $\sin(\theta_e)$ e $\cos(\theta_e)$,

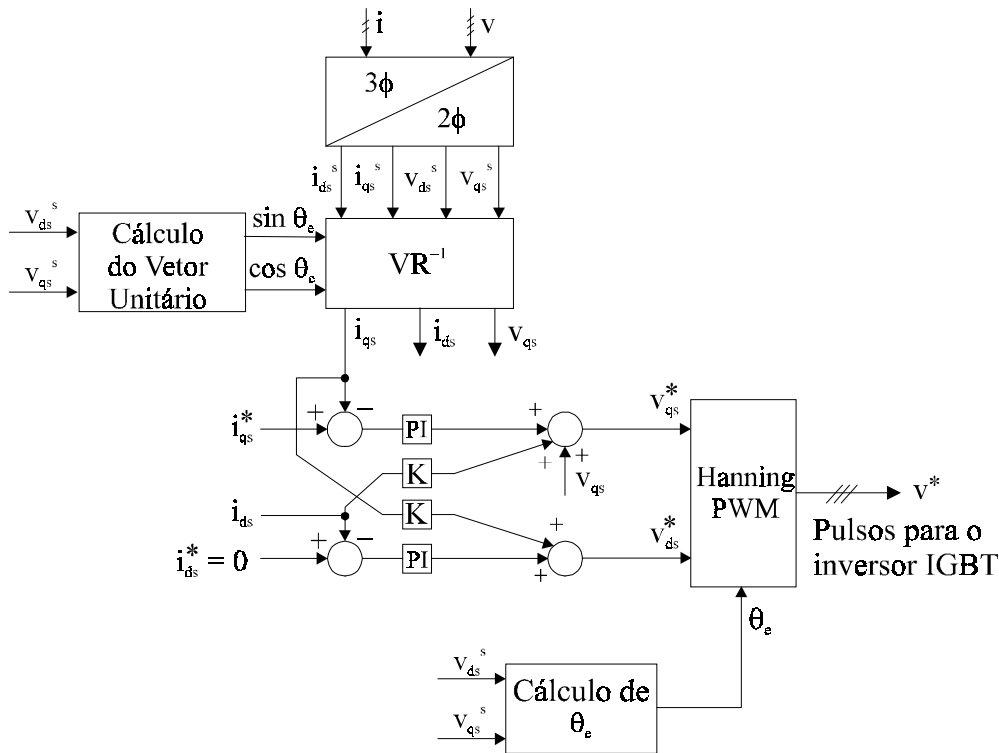


Fig. 6: Processamento de sinais para o controle vetorial direto (CVD) para o inversor conectado à rede elétrica

A próxima seção descreve a metodologia dos controladores *fuzzy* empregados no sistema.

3 CONTROLADORES *FUZZY*

A otimização de algum benefício ou a minimização de esforços que ocorrem em situações práticas dependem de uma função, denominada função objetiva ou de custo, onde expressam-se as relações entre as variáveis de decisão envolvidas. A Fig. 7 mostra uma função típica, onde o eixo-y representa uma variável física, tal como potência, força, velocidade, tensão ou resistência, e o eixo-x indica uma outra variável que pode ser manipulada de forma a se maximizar a abscissa. Por exemplo, um sistema de bombeamento pode ser controlado por uma válvula (eixo-x), conforme a válvula se abre, o fluxo de água aumenta, mas a pressão diminui e a potência (eixo-y) inicialmente aumenta, alcançando um máximo e diminuindo conforme a válvula continua se abrindo. Embora pareça trivial o rastreamento do valor máximo de uma função simples como essa, o valor de pico pode se alterar devido a:

- variação de parâmetros tais como temperatura, densidade, impedância;

- não-linearidades tais como zona morta e atrasos;
- dependência cruzada entre variáveis de entrada e de saída.

O enfoque para se tratar tais características poderia ser através de utilização de sensores para se melhorar a robustez paramétrica, preparação de equações analíticas e tabelas experimentais, ou então através de desacoplamento matemático *feedforward*. Todavia, a heurística empregada por operadores humanos poderia ser sintetizada na regra geral: “Se a última alteração na variável de entrada (x) provocar o aumento da variável de saída (y), mova a variável de entrada na mesma direção; se provocar uma diminuição, mova na direção oposta.” Um algoritmo de rastreamento de potência máxima pode ser construído baseado na regra geral acima, com duas entradas: a última variação da variável de controle e a variação da potência, de forma a se determinar a próxima variação da variável de controle, buscando atingir o máximo de potência. Essa metodologia foi empregada para se construir os algoritmos dos controladores FLC-1 e FLC-2 descritos a seguir. O algoritmo FLC-3 foi baseado em uma implementação de controle PI. O projeto das funções de pertinência e regras de controle pode também levar em consideração outros fatores, tais como o ponto de potência máxima pode ser encontrado

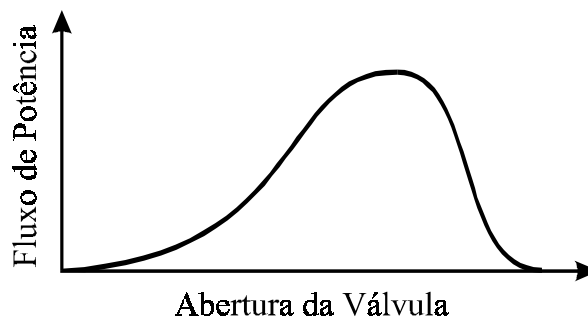


Fig. 7: Exemplo de otimização: fluxo de potência em termos de abertura de uma válvula

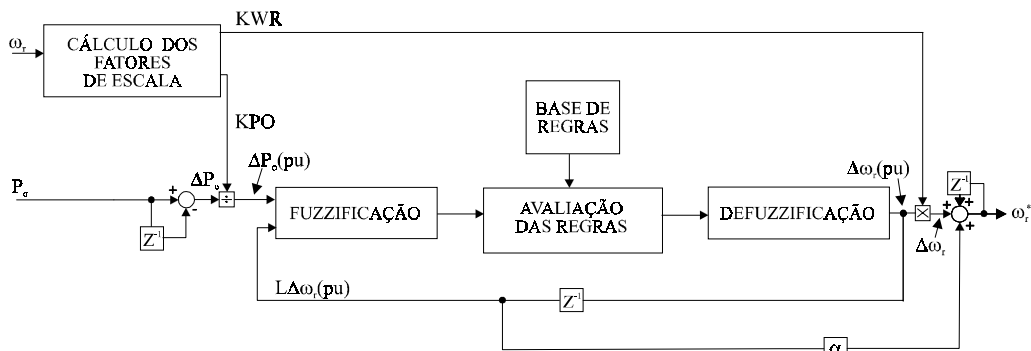


Fig. 8: Diagrama de blocos do controlador fuzzy FLC-1

sempre em uma direção, ou pode variar conforme algum parâmetro externo, o ponto de otimização pode se prender em um mínimo local, ou pode ocorrer problemas de quantização devido ao *hardware*, influenciando o algoritmo de rastreamento.

3.1 Controlador Fuzzy FLC-1

Em uma turbina eólica a potência instantânea de entrada, dada pelo produto do torque e da velocidade do gerador, é idêntica à da linha trifásica, desconsiderando-se as perdas. Logo, para um determinado valor de velocidade de vento, a função do controlador fuzzy FLC-1 é a de procurar a melhor velocidade do gerador, onde o sistema alcance a potência máxima na rede trifásica. As curvas que relacionam a variação da potência da turbina em termos de velocidade do vento estão descritas em (GTEE, 1997; Simões *et alii*, 1997a). O diagrama do controlador FLC-1 está indicado na Fig. 8. Estando inicialmente em regime permanente, se a velocidade do vento aumentar, a potência de saída aumentará porém não para o ponto ótimo, então o controlador FLC-1 realizará uma busca do novo valor de referência de velocidade do gerador. A operação do controlador FLC-1 não necessita de qualquer informação sobre a velocidade real do vento, sua procura baseada em tempo real observa diretamente a potência gerada na linha e portanto o algoritmo de rastreamento se torna insensível à variação de parâmetros do sistema.

As regras do controlador FLC-1 estão indicadas na Tabela 1, e estão baseadas no princípio que um aumento (ou diminuição) da velocidade do gerador provoca um correspondente acréscimo ou decréscimo da potência de saída P_o . A potência é calculada por intermédio de sensores de tensão e corrente conectados à linha trifásica, conforme já indicados na Fig. 2. Observando-se a Tabela 1 verifica-se que se ΔP_o for positivo em relação à última variação do gerador de velocidade ($\Delta \omega_r^*$), a

busca deve continuar na mesma direção; se for ao contrário, ou seja $+\Delta \omega_r^*$ causa $-\Delta P_o$, a direção de busca é então revertida. Quando a condição ótima é alcançada, a velocidade oscila dentro de uma margem pequena, alternando a polaridade do sinal de variação de velocidade. As variáveis ΔP_o (variação de potência), $\Delta \omega_r^*$ (variação de velocidade) e $L\Delta \omega_r^*$ (última variação da velocidade) são descritas por funções de pertinência conforme a Fig. 9; uma regra típica para FLC-1 é:

SE ΔP_o é PM (positivo médio) E $L\Delta \omega_r^*$ é P (positivo), ENTÃO $\Delta \omega_r^*$ é PM (positivo médio)

As funções de pertinência para ΔP_o e $\Delta \omega_r^*$ são assimétricas, de forma a se obter mais sensibilidade às variáveis em torno de

valores pequenos de variação de potência e velocidade; a cada instante, mais que uma (até quatro) regras são válidas. Na implementação do controle fuzzy, as variáveis de entrada são “fuzzificadas” e as regras de controle são avaliadas e combinadas, e finalmente a saída é “defuzzificada” convertendo-se para um valor real. Os valores do sinal de saída do controlador fuzzy ($\Delta \omega_r^*$) são acumulados de forma a se gerar o sinal de comando de velocidade. A saída $\Delta \omega_r^*$ é adicionada ao sinal $L\Delta \omega_r^*$ para evitar mínimos locais (GTEE, 1997; Simões *et alii*, 1997a). O controlador opera com variáveis escaladas em p.u., portanto o algoritmo de busca é universal a qualquer sistema. Os fatores de escala KPO e KWR são ganhos dependentes da faixa de velocidade de operação e são também provenientes de um algoritmo fuzzy, conforme indicado pelas funções de pertinência da Fig. 10 e Tabela 2. A escolha de ganhos de escala variáveis torna o controlador FLC-1 insensível à variação de velocidade.

Tabela 1: Regras do controlador fuzzy FLC-1

$L\Delta \omega_r^*$ ΔP_o (PU)	P	ZE	N
PVB	PVB	PVB	NVB
PB	PB	PVB	NB
PM	PM	PB	NM
PS	PS	PM	NS
ZE	ZE	ZE	ZE
NS	NS	NM	PS
NM	NM	NB	PM
NB	NB	NVB	PB
NVB	NVB	NVB	PVB

Tabela 2: Regras para ganhos de escala de FLC-1

ω_r	KPO	KWR
PSS	40	25
PSB	210	40
PMS	300	40
PMB	375	50
PBS	470	50
PBB	540	60

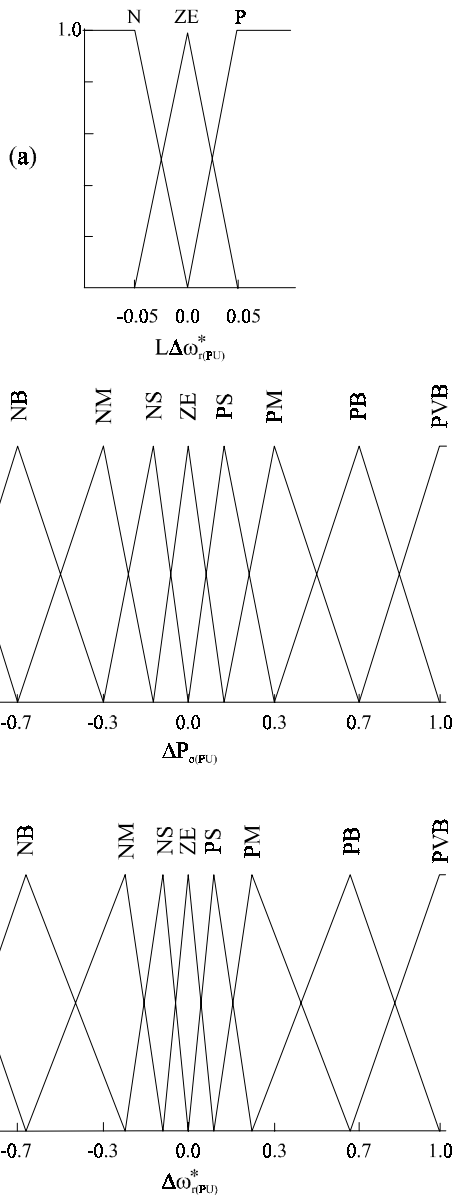


Fig. 9: Funções de pertinência para as variáveis do controlador *fuzzy* FLC-1: (a) Última variação de velocidade do gerador (entrada), (b) Variação da potência (entrada), (c) Variação da velocidade de referência do gerador (saída)

3.2 Controlador Fuzzy FLC-2

Uma turbina eólica está submetida a uma carga proporcional ao quadrado da velocidade angular do vento, assim, em condições de ventos fracos, abaixo de 7 m/s, o gerador trabalha tipicamente com carga (T_L) leve no rotor. Desta forma a intensidade de fluxo rotórico do gerador de indução (comandado no controle vetorial pela corrente i_{ds}) pode ser

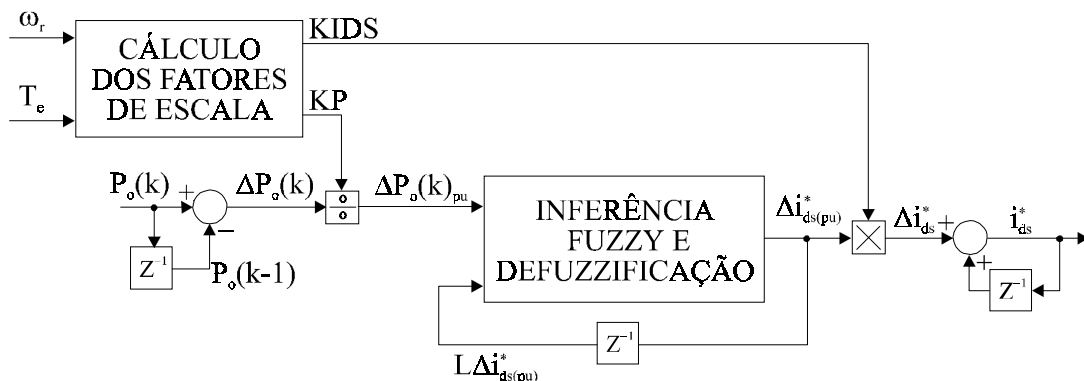


Fig. 11: Diagrama de blocos do controlador *fuzzy* FLC-2

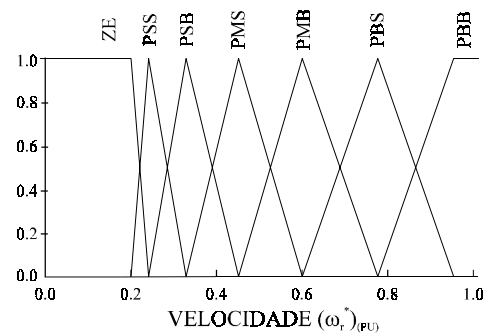


Fig. 10: Funções de pertinência para cálculo dos ganhos de escala KPO e KWR

reduzida para valores menores que o fluxo nominal, reduzindo-se a circulação de reativos, diminuindo-se as perdas de ferro no núcleo da máquina, e conseqüentemente aumentando-se o rendimento global do conjunto inversor-máquina (Souza *et alii*, 1995), o que para condições de ventos fracos é essencial para se melhorar a capacidade de extração de potência. A Fig. 11 apresenta o diagrama de blocos do controlador FLC-2 que executa a programação do fluxo rotórico, após ter sido estabelecida a velocidade de operação ideal. Para que o controlador FLC-2 inicie sua operação, a busca da referência de velocidade através de FLC-1 deve ter sido terminada. Assim o sistema estará sujeito a uma determinada velocidade de vento (V_w), em regime permanente, e com a correspondente velocidade ótima (ω_r^*) determinada por FLC-1. O fluxo do rotor (ψ_R) será então diminuído, através da diminuição da corrente de excitação (i_{ds}); as regras de FLC-2 observam a variação de potência (ΔP_o) e a última variação da corrente de excitação ($L\Delta i_{ds}^*$). A diminuição de i_{ds} causa um aumento na corrente de torque (i_{qs}), devido à ação da malha de velocidade. Como o fluxo reduz, as perdas no ferro da máquina diminuem, porém devido ao aumento da corrente de torque (i_{qs}), as perdas no cobre e no inversor aumentam. De maneira geral, as perdas totais do sistema (conversor e máquina), resultam no aumento da potência total gerada (P_o) inicialmente, atingindo um ponto máximo de uma curva convexa e se houver uma tendência de diminuição de i_{ds} além desse limite, o controlador FLC-2 comandará o retorno, devido à correspondente diminuição de potência. A Tabela 3 mostra o conjunto de regras e a Fig. 12 mostra as funções de pertinência do controlador FLC-2.

Os ganhos para escalamento das variáveis de entrada são calculados por (10) e (11), onde os fatores a , b , c_1 , c_2 e c_3 são ajustados através da modelagem das perdas da máquina de indução, e depois sintonizados experimentalmente (Souza *et alii*, 1995).

$$KP = a\omega_r + b \quad (10)$$

$$KIDS = c_1\omega_r - c_2T_e + c_3 \quad (11)$$

3.3 Controlador Fuzzy FLC-3

A malha de controle de velocidade é realizada pelo controlador FLC-3, em uma configuração tipo *Fuzzy-PI*. Esse controlador é robusto às ocorrências de rajadas de ventos e às pulsações de torque que ocorrem em TEVs. Tais distúrbios são modulados inversamente, prevenindo efeitos adversos de ressonância mecânica e da resposta de i_{qs}^* que ocorre devido à diminuição de fluxo imposta por FLC-2 (Simões *et alii*, 1997a). O diagrama de blocos do controlador *fuzzy* FLC-3 é mostrado na Fig. 13. A tabela 4 contém as regras e a Fig. 14 contém as funções de pertinência utilizadas para as variáveis de entrada e saída do controlador. O controle *fuzzy* FLC-3 é essencialmente um controlador integral (PI) onde os ganhos proporcional e integral são não-lineares e controlados adaptativamente. Os sinais de erro da malha de velocidade (E_{or}) e de variação do

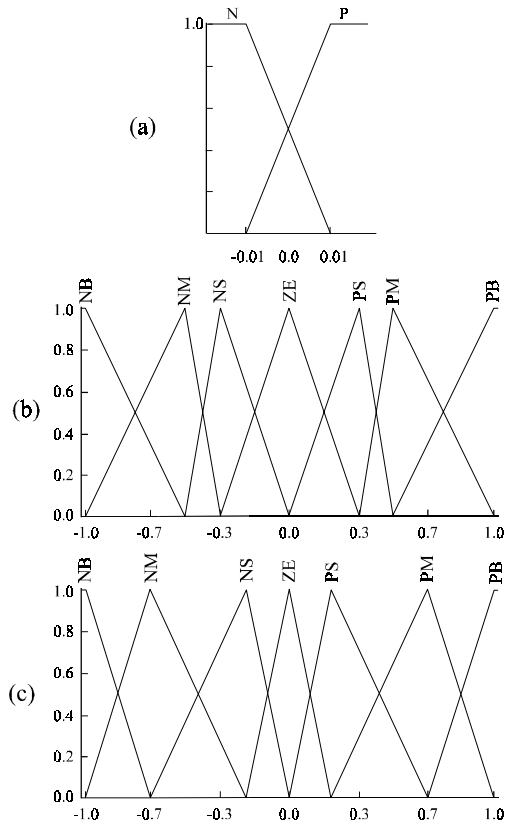


Fig. 12: Funções de pertinência para as variáveis do controlador *fuzzy* FLC-2: (a) Última variação de corrente de excitação, $L\Delta i_{ds}^*$ (entrada), (b) Variação da potência, ΔP_O (entrada), (c) Variação da próxima corrente de excitação, i_{ds} (saída)

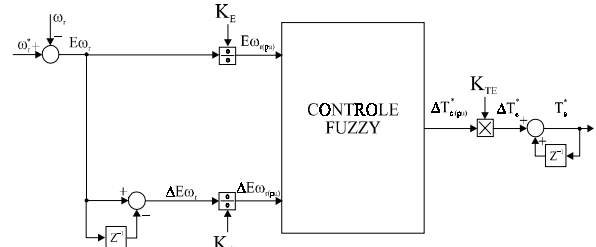


Fig. 13: Diagrama de blocos do controlador *fuzzy* FLC 3

erro (ΔE_{or}) são convertidos em sinais escalados em p.u. pelos fatores K_E e K_{CE} , respectivamente, e então processados. A saída do controlador *fuzzy* FLC-1 (ΔT_e^*) é acumulada de forma a produzir o torque de referência do gerador (T_e^*). Os ganhos K_E , K_{CE} e K_{TE} são utilizados para o escalamento das variáveis do controlador *fuzzy* FLC-3, respectivamente o *erro-velocidade*, a *variação-do-erro-de-velocidade* e a *variação-do-torque*. O ganho K_E é o máximo degrau de velocidade e K_{CE} é o máximo degrau de aceleração no sistema, tais características impõem o máximo degrau de torque permitido e por consequência o valor de K_{TE} . Salienta-se que FLC-3 faz o controle de velocidade do sistema, a busca efetivamente da velocidade ideal é feita pelo controlador FLC-1. Uma regra típica para FLC-3 é:

SE erro $\Delta\omega_{wr(pu)}$ é PS (positivo pequeno) **E** variação no erro $\Delta E_{wr(pu)}$ é PM (positivo médio) **ENTÃO** o torque incremental $\Delta T_e^*(pu)$ é PL (positivo grande)

Os controladores *fuzzy* FLC-1 e FLC-2 apresentam uma grande vantagem nesta aplicação sobre os controladores de rastreamento convencionais, implementados através de tabelas, ou então baseados em "hill-climbing", pois fornecem tamanho adaptativo do passo de busca, permitindo rápida convergência, além de poder aceitar sinais ruidosos e imprecisos. O controlador FLC-3 torna o sistema eólico imune às ressonâncias típicas das turbinas de eixo vertical além de melhorar a robustez quanto a vórtices, rajadas de vento e perturbações.

4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

É necessário um procedimento adequado para a inicialização do sistema conforme descrito anteriormente, bem como o correto seqüenciamento de desligamento, no caso de falhas. Além disso a operação dos controladores *fuzzy* FLC-1 e FLC-2 deve ser gerenciada: inicialmente FLC-1 opera de forma a otimizar a eficiência aerodinâmica da turbina, e em seguida FLC-2 opera de forma a otimizar o nível de fluxo no gerador

Tabela 4: Regras do controlador *fuzzy* FLC-3

CE	E	NVL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PVL
NVL						NVL	NL	NM	NS	ZE
NL						NL	NM	NS	ZE	PS
NM					NL	NM	NS	ZE	PS	PM
NS				NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
ZE			NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	
PS		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL		
PM		NM	NS	ZE	PS	PM	PL			
PL		NS	ZE	PS	PM	PL				
PVL		ZE	PS	PM	PL	PVL				

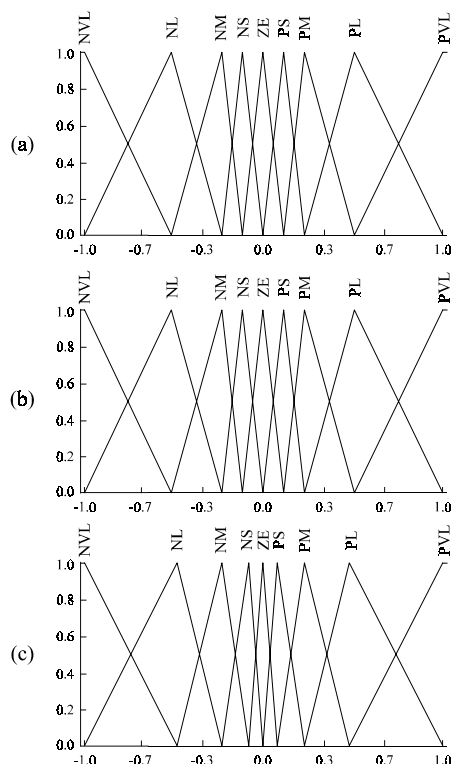


Fig. 14: Funções de pertinência para as variáveis do controlador fuzzy FLC-3: (a) Erro de velocidade (entrada), (b) Variação do erro de velocidade (entrada), (c) Variação do torque de referência (saída)

de indução. A Fig. 15 apresenta o diagrama do controle de tal sequenciamento.

Enquanto o controle de velocidade efetuado pelo controlador fuzzy FLC-3 é sempre ativo, os controladores FLC-1 e FLC-2 operam em seqüência para variações de velocidade do vento, ou para turbulências muito pequenas. Inicialmente o capacitor do elo CC se carrega no valor de pico da tensão de linha, através de uma resistência série. Após a estabilização do elo CC a resistência é eliminada do circuito através de um relê, o fluxo nominal é imposto na máquina de indução, estabelecendo corrente contínua em duas fases da máquina. A turbina é ligada em controle de velocidade, e conforme o vento impõe operação regenerativa com freqüência de escorregamento negativa, a

potência começa a fluir fazendo com que a tensão do elo CC aumente. A malha de controle de tensão do elo CC entra em operação de forma a estabelecer um valor de tensão maior que o valor de pico da tensão de linha trifásica, assim o controle do inversor conectado à rede trifásica pode operar na região linear da modulação em largura de pulso. A partir desse instante o controlador FLC-1 começa a rastrear a velocidade de referência ótima (ω_r^*), a potência gerada começa a crescer até o controlador FLC-1 estabelecer-se em regime permanente, indicado por uma pequena variação em $|\Delta_{or}^*|$. A partir de então, a operação do sistema é transferida para o controlador FLC-2, que busca otimizar o fluxo de excitação do gerador pela diminuição de i_{ds}^* . Conforme pode ser observado no diagrama de sequenciamento de controle na Fig. 15, se durante a procura da velocidade, ocorrer variações muito grandes na potência, devido à variação da velocidade do vento, o sistema é transferido de FLC-1 para um estado de espera não-fuzzy. Durante a otimização do fluxo, a corrente de excitação (i_{ds}^*) é diminuída adaptativamente, através da variação de passo imposta pela ação do controlador FLC-2 (GTEE, 1997; Simões *et alii*, 1997a). O controle é transferido para a operação ótima quando a variação $|\Delta i_{ds}^*|$ for pequena, então a procura de ponto ótimo de operação estará finalizada, e serão mantidos os ponto de operação ω_r^* e i_{ds}^* . A potência e a variação de potência são armazenadas de forma a se detectar qualquer variação na velocidade do vento que necessite de um novo processo de rastreamento. Também, durante a operação de FLC-2, qualquer transiente no eixo do gerador, indicado pela variação do torque, transferirá o sistema para o estado de espera não-fuzzy. O sistema possui indicações externas de falhas da turbina e dos inversores, que podem inclusive indicar operação em velocidades de vento muito elevadas (o que é perigoso para um sistema eólico), ou quando a geração não for satisfatória devido à velocidade do vento ser demasiado baixa. As indicações de falhas provocam o desligamento do sistema. Nesse caso, os controladores fuzzy são desabilitados e uma rampa de desaceleração é imposta na velocidade, em malha aberta; as lâminas da turbina são posicionadas de forma a que o vento passe livremente, e finalmente o contator de linha desconecta o sistema.

A Fig. 16 mostra o diagrama de blocos do hardware de um protótipo de 3,5 kW construído em laboratório, para validação dos algoritmos de controle necessários, visando uma futura

Tabela 5: Aumento da potência do sistema através do controle por lógica fuzzy

Veloc. do vento (pu)	Potência para r^* fixo (0.575 pu)	$\bullet P_o$ devido à ação de FLC-1 (pu)	$\bullet P_o$ devido à ação de FLC-2 (pu)	Aumento da eficiência devido à FLC-1 (%)	Aumento da eficiência devido à FLC-2 (%)	Aumento total de eficiência devido ao controle fuzzy (%)	Aumento médio de eficiência devido à ação de FLC-1 (%)	Aumento médio de eficiência devido à ação de FLC-2 (%)	Aumento total médio de eficiência (%)
0.5300	0.0581	0.0626	0.0343	107.67	28.45	136.12	35.525	8.616	44.141
0.5691	0.1250	0.0990	0.0466	79.25	20.81	100.06			
0.6083	0.1740	0.0893	0.0390	51.36	14.82	66.18			
0.6475	0.2383	0.0643	0.0321	27.01	10.63	37.64			
0.6866	0.2941	0.0269	0.0250	9.17	7.78	16.95			
0.7258	0.3302	0.0024	0.0193	0.73	5.81	6.54			
0.7650	0.3604	0.0064	0.0183	1.77	5.00	6.77			
0.8041	0.4330	0.0399	0.0151	9.21	3.20	12.41			
0.8433	0.4500	0.0890	0.0145	19.78	2.69	22.47			
0.8825	0.5000	0.1522	0.0132	30.44	2.02	32.46			
0.9216	0.5300	0.2135	0.0124	40.28	1.67	41.95			
0.9608	0.6250	0.3099	0.0041	49.58	0.44	50.02			

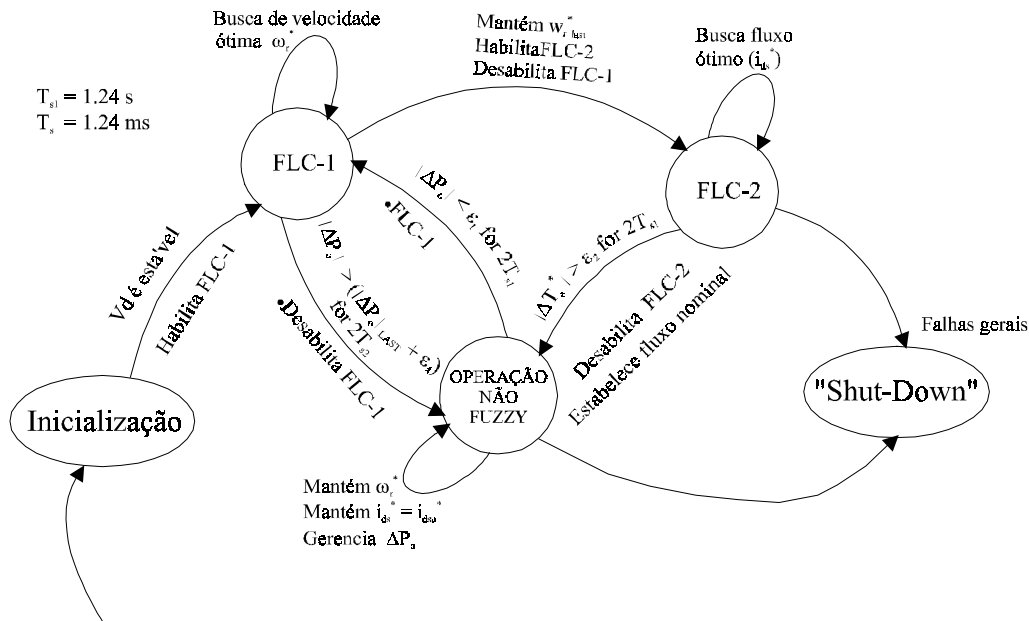


Fig. 15: Diagrama de sequenciamento de controle

instalação com maior potência. Uma descrição detalhada do *hardware* e *software* de controle do projeto está fora do escopo deste artigo devido à sua complexidade. Há duas placas processadoras digitais de sinais (DSP) que utilizam o processador TMS320C30 da Texas Instruments, essas placas são conectadas à via de um computador PC e possuem conexões com placas analógicas de entrada/saída. O TMS320C30 é um DSP que possui um ciclo de instrução de 60 ns e executa operações em ponto flutuante. A estrutura de *software* é multi-tarefa, baseada em linguagem "C", com rotinas de controle de interrupções e restauração de contexto escritas em *assembler*. Os dois DSP's se comunicam através de duas portas seriais, que permitem comunicação em 6 Mbits/s, suficiente para troca de variáveis das rotinas de controle.

Cada inversor utiliza um circuito integrado PWM, um ASIC híbrido que incorpora um *hardware* digital dedicado e um microprocessador RISC para rotação vetorial (Hanning, 1993). Este circuito integrado recebe um comando de tensão da malha de controle de corrente síncrona, rotaciona-o vetorialmente no

sistema d^s-q^s com a informação do vetor unitário, convertendo os sinais no sistema a-b-c, e finalmente os pulsos de PWM comandam o inversor. Este circuito também permite adição programada de terceira harmônica, para melhorar a eficiência da modulação, permite controlar o "dead-time", corrigindo a distorção causada por esse parâmetro, além de impor tempos de condução mínima e máxima do inversor, visando a proteção dos semicondutores IGBT. Os inversores foram construídos com os módulos IntelliMod da Powerex, que possuem "gate-drives" internos, proteção de sobrecorrente e sobretemperatura, e transistor interno para frenagem dinâmica. No laboratório foi utilizado um dinamômetro eletrônico para se comportar conforme uma turbina eólica, onde o modelo aerodinâmico da turbina eólica foi executado em tempo real (Simões *et alii*, 1997a), o vento como uma variável de *software*, que poderia tanto ser comandada externamente pelo operador do protótipo, como lida de um arquivo no computador hospedeiro dos DSP's a cada 1 ms. Como o dinamômetro e o sistema de geração estavam conectados na mesma linha trifásica, a potência circulava entre ambos, a menos das perdas.

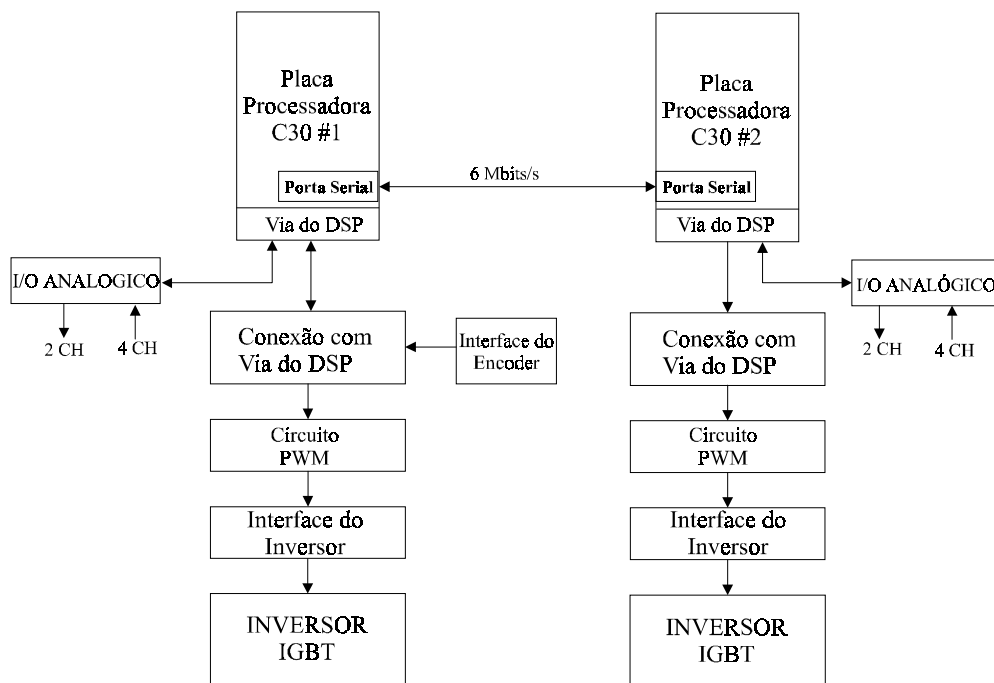


Fig. 16: Diagrama de blocos do *hardware* baseado em dois DSP's

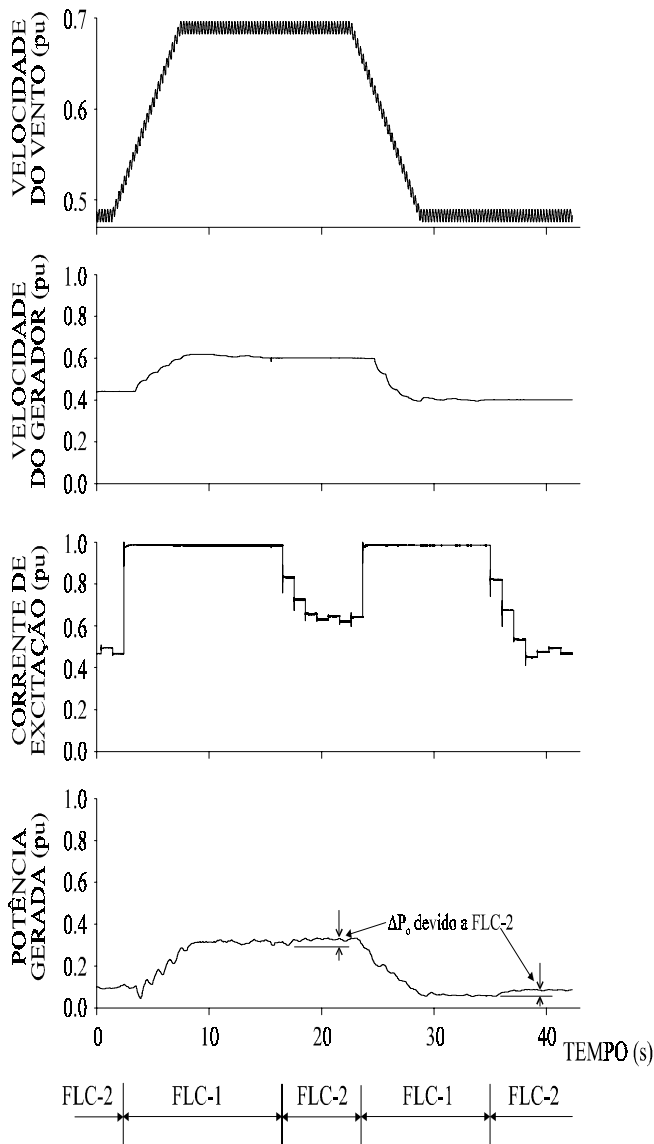


Fig. 17: Operação dos controles fuzzy: (a) Velocidade do vento, (b) Velocidade do gerador, (c) Corrente de excitação, (d) Potência de Saída

O sistema de energia eólica foi exaustivamente avaliado em laboratório. Vários pontos de operação da região torque versus velocidade angular foram cobertos para se impor os algoritmos de otimização de FLC-1 e FLC-2, com excelente desempenho transitório e fator de potência unitário (GTEE, 1997). O desempenho foi comparado a um gerador operando com referência de velocidade fixa pelo operador; tal comparação foi realizada devido ao fato que em um sistema tradicional de geração eólica a velocidade de referência do gerador é mantida constante, e o usuário casualmente altera o ponto de operação. A Fig. 17 mostra a resposta do sistema com os controladores FLC-1, FLC-2 e FLC-3 quando a velocidade do vento é alterada para cima e para baixo. A melhoria da eficiência devido às ações de FLC-1 e FLC-2 estão descritas na Tabela 5, mostrando que a operação de FLC-1 fornece uma maior potência, exceto quando a velocidade fixa do gerador já está otimizada para aquela velocidade do vento. A operação de FLC-2 melhora o desempenho principalmente para ventos fracos, devido à redução do nível de fluxo rotórico no gerador de indução. A média total de melhoria de eficiência para a operação de FLC-1 é de 35,5%, e para a operação de FLC-2 de 8,6%. Em todos os modos de operação as tensões e correntes da linha são senoidais, com fator de potência unitário, e as

correntes do gerador de indução têm baixa distorção harmônica.

5 CONCLUSÃO

Um sistema de controle para geração de energia eólica, em velocidade variável, baseado em controle *fuzzy*, foi analisado e foi apresentado o projeto de um protótipo de laboratório, que permitiu a avaliação das estratégias de controle sugeridas. Há três controladores *fuzzy* no sistema: o controlador FLC-1 busca a todo instante otimizar a velocidade do gerador, visando maximizar a eficiência aerodinâmica da turbina eólica, o controlador *fuzzy* FLC-2 programa o fluxo rotórico da máquina, de forma a melhorar a diminuir as perdas do sistema máquina-conversor e o controlador *fuzzy* FLC-3 impõe uma malha de velocidade robusta às pulsações de torque e rajadas de vento, além de minimizar o acoplamento na corrente de torque em quadratura do gerador devido à ação de FLC-2. As vantagens da utilização dos controladores *fuzzy* em um projeto como esse são: insensibilidade à variação de parâmetros, rápida convergência, e aceitação de sinais ruidosos e imprecisos. Os algoritmos utilizados nos controladores *fuzzy* são universais, podendo ser aplicados em sistema similares. O trabalho demonstrou que o desempenho do sistema, tanto em regime permanente, quanto dinamicamente, foi excelente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bose, B. K. (1986). *Power Electronics and AC Drives*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- GTEE, (1997). Grupo de Trabalho de Energia Eólica, Ata da III Reunião do GTEE - Belém, (3 a 6 de junho)
- Hanning Elektro-Werke GmbH, (1993). Outubro PWM Chip 1/87 data sheet.
- Simões, M. G. , (1995). *Fuzzy Logic and Neural Network Based Advanced Control and Estimation Techniques in Power Electronics and AC drives*, Ph.D. Dissertation, (Dec.), The University of Tennessee.
- Simões, M. G., B. K. Bose and Ronald J. Spiegel, (1997a). "Design and performance evaluation of a fuzzy-logic-based variable-speed wind generation system" *IEEE Transactions on Industry Applications*, (July/August) , vol. 33, pp. 956-965.
- Simões, M.G., B. K. Bose, and R.J. Spiegel, (1997). "Fuzzy logic based intelligent control of a variable speed cage machine wind generation system", *IEEE Transactions on Power Electronics*, (Jan.) vol. 12, pp. 87-95,
- Sousa, G.C.D., B.K.Bose and J.G.Cleland, (1995.). Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector controlled induction motor drive", *IEEE Trans. Ind. Elec.*, (April), vol.42, pp. 192-198
- Sukegawa, T. K. Kamiyama, J. Takahashi, T. Ikimi, and M. Matsutake, (19??). "A multiple PWM GTO line-side converter for unity power factor and reduced harmonics", *IEEE/IAS Annu. Meeting Conf.*
- Zargari, N. R., G. Joos, (1995) "Performance investigation of a current-controlled voltage-regulated PWM rectifier in rotating and stationary frames", *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, (Aug), vol. 42, no. 4, pp. 396-401.