

CONTROLE “FUZZY” DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO PARA MICRO CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Felipe Nascimento Martins ⁽¹⁾ e Gilberto Costa Drumond Sousa ⁽²⁾

(1) UCL – Faculdade do Centro Leste

Av. Lourival Nunes, 181 – Jardim Limoeiro, CEP 29164-050 – Serra, ES - Brasil

(2) UFES – Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari, 514 - Campus Universitário de Goiabeiras - Prédio CT-2, CEP 29075-910 – Vitória, ES - Brasil

e-mail: g.sousa@ele.ufes.br

Resumo - Este trabalho apresenta estudo, simulação e implementação em laboratório de um sistema de geração de energia elétrica que pretende aproveitar a energia disponibilizada por córregos e rios através de micro centrais hidrelétricas. A máquina de indução é utilizada como gerador, e o controle de amplitude da tensão gerada é feito através do fornecimento ou absorção de potência reativa da máquina, conforme necessário. Esta é fornecida ou absorvida por um compensador estático de reativos (STATCOM), formado basicamente por um inversor PWM trifásico controlado por um processador digital de sinais (DSP). No programa do DSP são usados controladores PI clássicos e controladores baseados em lógica “Fuzzy”. O desempenho do sistema é validado através de simulação quando operando apenas com controladores PI, e experimentos quando operando também com controladores “Fuzzy”.

Palavras-Chave – Controle Fuzzy, Geração Distribuída, Gerador de Indução, Micro Central Hidrelétrica, STATCOM.

FUZZY CONTROLLED INDUCTION GENERATOR SYSTEM FOR MICRO HYDROELECTRIC PLANTS

Abstract – This paper discusses the simulation and practical implementation studies for an Induction Generator (IG) system that provides regulated voltage at any load condition. It utilizes the classical self-excitation principle but, in addition to that, it makes use of a static var compensator (STATCOM), essentially a current regulated PWM inverter, to control the output voltage magnitude. It is primarily intended for micro hydro plants to be used in rural areas, where the cost of conventional distribution system is high, and the water resources are available to drive an unregulated low head turbine. The proposed topology is presented, followed by an analysis of the control structure. The methodology is validated via simulation studies using classic PI controllers and experimental studies using both PI and Fuzzy logic based controllers.

Artigo submetido em 29/08/2006. Revisões em 09/03/2007 e 15/05/2007. Aceito pro recomendação dos editores da Seção Especial D. C. Martins e F. L. M Antunes.

Keywords - Induction machines, inverters, fuzzy control, renewable energy, STATCOM

I. INTRODUÇÃO

O racionamento de energia experimentado pelo Brasil no ano de 2001 e início de 2002 motivou muitos investimentos na área de geração e transmissão de energia elétrica. O Governo Federal tem incentivado o combate ao desperdício de energia elétrica [1] e a construção de novas usinas, principalmente termelétricas, por serem de construção mais rápida. Porém, usinas termelétricas dependem de combustível disponível no local de geração, produzem gases que provocam poluição atmosférica e precisam ser economicamente viáveis, o que quase sempre significa gerar grandes quantidades de energia. Isso inviabiliza a construção de pequenas centrais locais, que poderiam ficar próximas dos consumidores para suprir pequenas demandas. A construção de várias pequenas centrais diminuiria os custos com transmissão e distribuição da energia, além de reduzir as perdas relacionadas com seu transporte.

Conforme dados do Programa Luz no Campo, da Eletrobrás, a Eletrificação Rural no Brasil é bastante deficiente no que se refere ao percentual de propriedades atendidas [2]. Esse cenário é consequência do elevado custo de instalação e manutenção de redes rurais de transmissão e distribuição de energia, fruto das grandes distâncias, da baixa densidade de cargas e de sua baixa demanda. Pela legislação atual, as concessionárias de energia têm prazo até dezembro de 2015 para eletrificar todos os domicílios sem acesso à energia no Brasil [3].

Nas regiões em que a extensão da rede até o consumidor não é economicamente viável, o aproveitamento de fontes locais para geração de energia torna-se bastante interessante. A disponibilidade de recursos hídricos, as grandes distâncias até as linhas de transmissão e a baixa densidade de consumidores fazem com que a construção de Micro Central Hidrelétricas (MCHs) seja atraente. Além disso, a construção de uma MCH tem impacto ambiental bastante reduzido: não é necessário o desvio do curso de rios, o represamento de água em grande escala e nem a queima de nenhum tipo de combustível fóssil.

O presente artigo apresenta uma proposta de topologia de controle para um sistema de geração de energia elétrica que pode ser instalado em propriedades rurais ou pequenos povoados, e que pode funcionar de maneira independente do sistema interligado. A energia primária a ser aproveitada é de natureza hidráulica, o que leva o sistema estudado a ser classificado como uma MCH.

O sistema proposto usa a Máquina de Indução (MI) como gerador. Apesar de apresentar problemas como pobre regulação de tensão e variação de frequência [4], a MI gaiola é uma opção interessante para utilização em locais remotos por requerer menos manutenção, quando comparada a outros tipos de geradores.

Características como variação de parâmetros, não-linearidades e saturação fazem com que o gerador de indução seja de difícil controle com o uso de controladores clássicos. Controladores baseados em lógica “fuzzy” são capazes de operar processos não-lineares complexos, mesmo em ambientes com imprecisão, incerteza, e na presença de ruído [5]. Por isso, o sistema proposto utiliza esse tipo de controlador nas malhas de controle de tensão.

O artigo está organizado da seguinte forma: a seção II apresenta uma revisão da utilização da MI como gerador. As seções III e IV descrevem o sistema proposto e a estratégia de controle, respectivamente. Resultados de simulação são apresentados na seção V. A seção VI trata da utilização dos controladores “fuzzy” e de sua implementação. Resultados experimentais são mostrados na seção VII. Finalmente, na seção VIII são apresentadas as conclusões.

Resultados do presente trabalho também foram divulgados nos congressos IEEE PEDS 2001 [6], CBA 2004 [7] e CBE 2006 [8].

II. A MÁQUINA DE INDUÇÃO COMO GERADOR

A máquina de indução (MI) é capaz de operar como gerador autônomo se for provida de excitação suficiente [9][4]. A equação 1 é válida para pequenos valores de escorregamento [10]. Mostra que, sob fluxo constante, o torque eletromagnético da MI é diretamente proporcional ao seu escorregamento que, se negativo, promoverá torque negativo:

$$T_e = 3 \frac{P}{2} \frac{1}{R_r} \psi_m^2 \omega_{SL}, \quad (1)$$

onde T_e representa o torque eletromagnético, ω_{SL} é o escorregamento, ψ_m é o fluxo de magnetização por pólo, P é o número de pólos da máquina e R_r é o valor de sua resistência de rotor.

Se comparada à máquina de corrente contínua e à máquina síncrona, a máquina de indução gaiola de esquilo é mais robusta, mais barata, requer menos manutenção e possui maior relação potência/peso [10]. Essas características, principalmente o fato de a MI requerer menos manutenção, fazem com que o uso dessa máquina como gerador seja interessante em locais remotos, como propriedades rurais ou pequenos povoados[4]. Além disso, a MI é a máquina elétrica mais empregada como motor em instalações industriais [10] e, por isso, existe grande disponibilidade no mercado. Isso se traduz em maior facilidade de substituição e menor custo de manutenção. Outra característica que motiva a utilização da MI como gerador é o fato desta não ser capaz de fornecer corrente de falta de forma sustentada [11][4].

Apesar de todas essas características favoráveis, a MI é muito pouco utilizada como gerador devido à sua pobre regulação de tensão e variação de frequência, mesmo quando

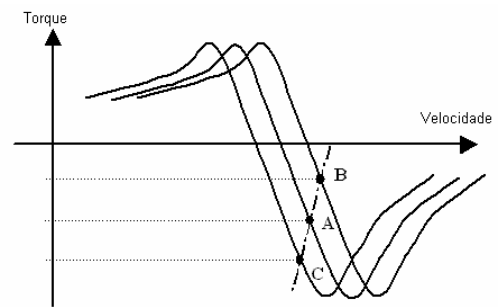


Fig. 1 Característica Torque x Velocidade do gerador de indução.

acionada à velocidade constante e alimentando carga resistiva [9][12][13][14]. Tensão e frequência nos terminais do GI variam de acordo com a potência ativa absorvida pela carga a ele conectada.

A operação do gerador de indução isolado da rede pode ser mais bem compreendida com auxílio da Figura 1. Nesta figura a característica torque-velocidade simplificada da máquina primária é representada de forma linear, que representa uma turbina hidráulica não controlada operando sob vazão constante de água. A característica torque-velocidade do gerador de indução, por sua vez, varia com a frequência síncrona. Assuma-se que o gerador de indução alimenta uma carga CA constante. Um ponto de equilíbrio será atingido quando o torque eletromagnético do gerador se igualar ao torque desenvolvido pela máquina primária, por exemplo, representado pelo ponto A. Se a carga CA diminui, outro ponto de equilíbrio será atingido, como o ponto B, por exemplo. Isso resulta no aumento da velocidade mecânica do gerador e da frequência da tensão gerada. De forma contrária, um aumento na carga conectada ao gerador resulta em diminuição da velocidade mecânica e da frequência síncrona, como ilustrado pelo ponto C.

A amplitude da tensão gerada também varia com a carga, pois a característica de magnetização da máquina de indução depende da frequência, como ilustra a equação 2.

$$E = 4,44K f N \psi_m, \quad (2)$$

onde E é a amplitude da tensão gerada, f é a frequência da tensão gerada, e K é uma constante que depende de aspectos construtivos da máquina.

O fornecimento da potência reativa necessária para excitar a MI deve ser feito por uma fonte externa, como um banco de capacitores (gerador auto-excitado), por um compensador estático de reativos (STATCOM), ou uma combinação destes, como mostrado na Figura 2. Nesse caso o STATCOM é baseado num inversor VSI operando com modulação PWM. Esse inversor, devidamente controlado, é capaz de fornecer potência reativa suficiente para excitar a MI e alimentar a carga, caso esta solicite.

III. O SISTEMA PROPOSTO

A Figura 2 mostra o gerador de indução auto-excitado conectado a um inversor PWM trifásico, que é a topologia proposta para funcionamento em MCHs. O banco de

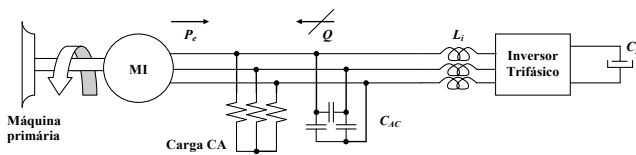


Fig. 2 GI auto-excitado conectado a inversor PWM trifásico

capacitores C_{AC} fica responsável, apenas, pelo fornecimento da potência reativa necessária para que a MI tenha, a vazios, tensão nominal em seus terminais. O inversor responde pela potência reativa (Q) solicitada ou fornecida pela carga (ou seja, é capaz de fornecer ou drenar potência reativa) e pelo acréscimo de potência reativa necessária para manter o fluxo de entreferro do GI com a variação da potência ativa da carga.

Outros autores apresentaram estudos de sistemas de geração usando máquina de indução (GI) e inversor trifásico controlados de diferentes maneiras. Pomilio e Marra propuseram [13] um sistema no qual o inversor PWM trabalha com frequência constante. Nesse caso, o inversor mantém estável a frequência da tensão gerada e faz a compensação da potência reativa do sistema. Isso resulta em tensão terminal de amplitude constante em regime permanente. No entanto, é necessário que exista um regulador de velocidade para a turbina primária de modo que a potência gerada seja igual à solicitada pela carga. Se a potência ativa gerada for maior que a absorvida pela carga, parte dela irá para o inversor, o que provocará a carga do capacitor do elo CC e aumento de sua tensão terminal. O controlador de velocidade, nesse caso, utiliza a informação de tensão do elo CC como referência para controle da velocidade da turbina. Desvantagens desse sistema são a existência de um controlador de velocidade para a máquina primária e o alto valor de capacitância necessário para manter boa regulação de tensão. Os autores indicaram um valor de 100mF para uma MI de 50hp.

Os mesmos autores propuseram em [15] e em [16] outras versões do sistema do GI auto-excitado conectado a um inversor trifásico. Nessas propostas a turbina não tem velocidade controlada. Para que a frequência da tensão terminal permaneça constante, toda a potência gerada pela

MI deve ser consumida. Os autores abordam duas propostas: numa delas, uma carga adicional pode ser conectada ao elo CC para que seja acionada através de um “chopper”, de modo que a absorção global de potência ativa seja mantida constante. Em outra, a parte excedente da potência ativa pode ser entregue a uma rede monofásica. O controle da ativação dessa carga ou da potência enviada à rede monofásica é feito com base no valor de tensão do elo CC, como no sistema anterior. Ponto negativo desses sistemas é a necessidade de o gerador operar a plena carga durante todo o tempo.

Em [12] Leidhold e Garcia apresentam um sistema de GI auto-excitado com inversor conectado onde o chaveamento do inversor é controlado com base nos valores das correntes de linha, tensão gerada e tensão no elo CC. O sistema mantém a amplitude da tensão gerada constante em regime, mas não controla a variação de sua frequência. O erro na amplitude da tensão terminal gera a referência para a corrente responsável pela potência reativa do inversor e o erro na tensão do elo CC gera a referência para a corrente responsável pela potência ativa. Desvantagens desse sistema são a necessidade de se usar 4 sensores de corrente e um de velocidade e o fato de terem sido feitas simplificações no modelo do sistema para a geração do algoritmo de controle. Uma das simplificações foi considerar o sistema operando sempre em regime permanente.

O sistema aqui proposto se diferencia dos citados por não exigir controlador de velocidade para a máquina primária, gerar potência ativa apenas em valor suficiente para suprir a carga, não usar sensor de velocidade e utilizar o modelo dinâmico do sistema para geração do algoritmo de controle.

O diagrama geral do sistema proposto é ilustrado na Figura 3. Consiste de uma máquina de indução trifásica gaiola de 5hp, 4 pólos, 220V, 60Hz, um banco de capacitores C_{AC} e o STATCOM, formado pelo inversor trifásico em série com filtros indutivos (L_i), utilizado no gerenciamento do fluxo de potência reativa. A figura mostra a máquina de indução (MI) conectada ao STATCOM, ao banco de capacitores C_{AC} e à carga. Os resistores R_i representam a resistência intrínseca dos filtros. O capacitor do elo CC do inversor é representado por C_{DC} . O resistor R_{AUX} , ligado em série com C_{DC} , serve para limitar a corrente de carga do capacitor durante a partida do sistema. Quando em regime,

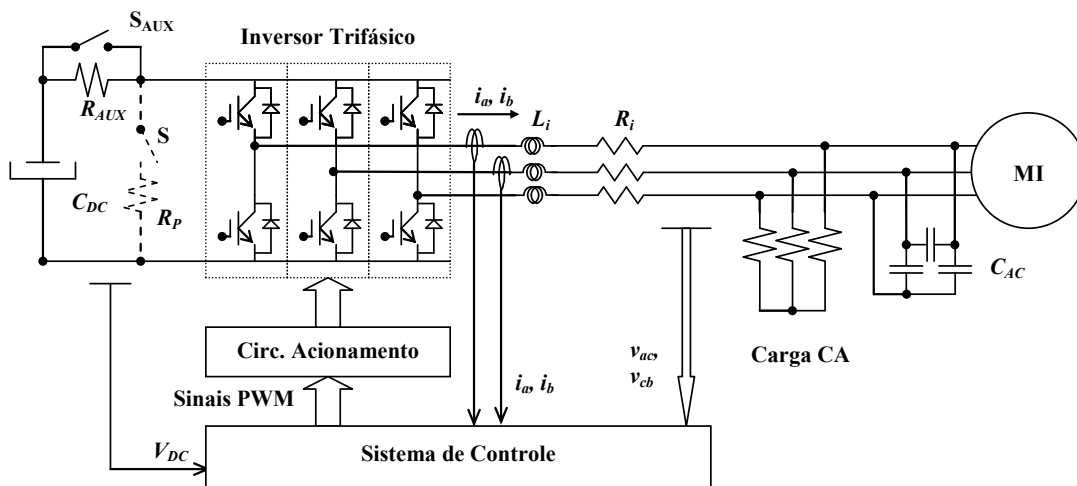


Fig. 3. Diagrama geral do sistema proposto.

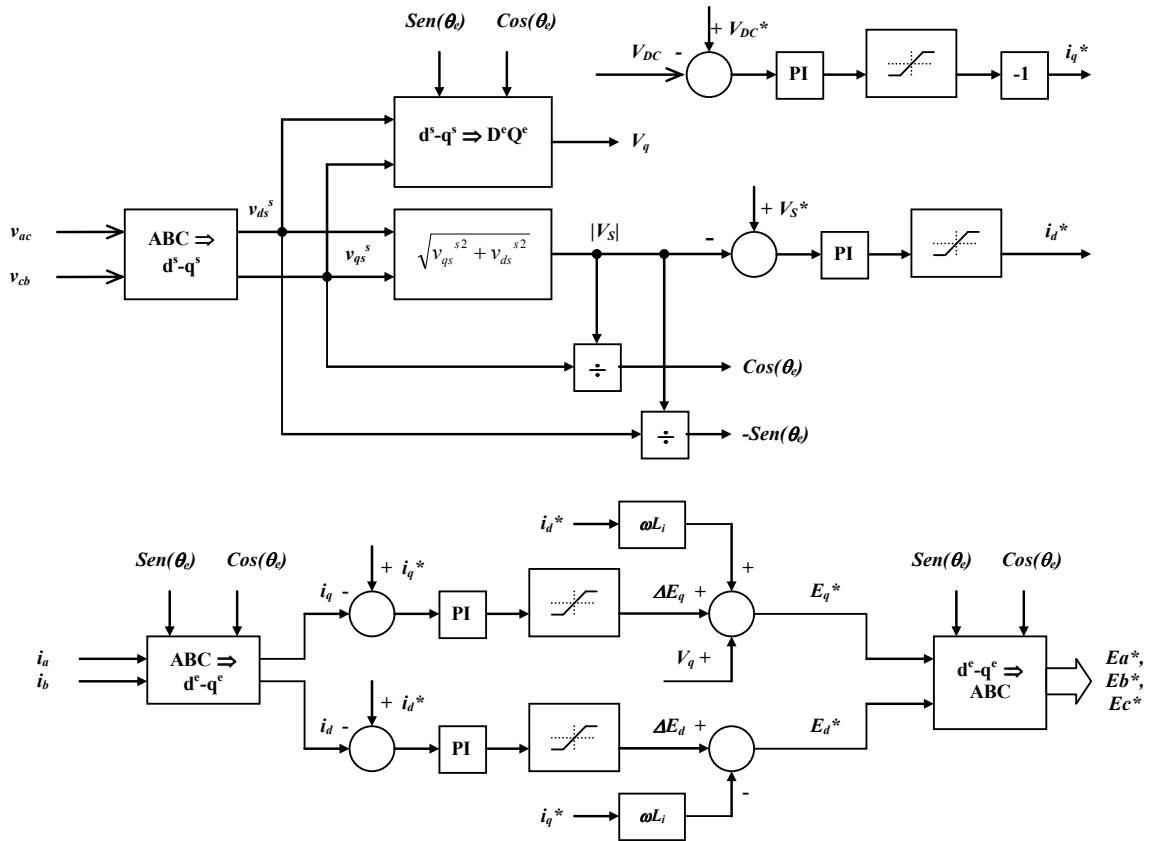


Fig. 4. Diagrama de blocos do sistema de controle.

R_{AUX} é curto-circuitado pela chave S_{AUX} , de forma que o capacitor C_{DC} fique ligado diretamente ao inversor. O resistor R_p e a chave S são opcionais. Servem para dissipar potência ativa excedente e limitar a excursão da tensão de elo CC (V_{DC}). Podem também ser usados para limitar a variação da frequência da tensão terminal do GI.

O sistema de controle recebe as informações de tensão no elo CC (V_{DC}), correntes na saída do inversor (i_a , i_b) e tensão nos terminais do gerador (v_{ac} e v_{cb}). Gera, então, sinais PWM para o comando das chaves do inversor, como detalhado a seguir.

IV. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A estratégia de controle proposta é ilustrada em detalhes na Figura 4. É baseada nas equações do fluxo de potências ativa e reativa entre dois barramentos num determinado sistema de potência. Um asterisco indica valor de referência para determinada grandeza. As malhas de controle de tensão e corrente estão no referencial d-q síncrono devido ao fato desses valores aparecerem como quantidades CC nesse referencial [10], assegurando-se erro zero em regime permanente com o uso de controladores PI.

O objetivo principal do sistema de controle é manter constante o valor da tensão gerada pela MI, tanto em regime permanente quanto durante transitórios. Para isso, como nos trabalhos citados anteriormente [12][13][15][16], o sistema proposto usa o valor da tensão no elo CC para controle do fluxo de potência ativa, e o valor da tensão terminal gerada para controle do fluxo de potência reativa.

Neste trabalho, o eixo q^e do referencial síncrono é alinhado com o vetor tensão terminal V da MI, o que resulta em $V_q = V_{pico}$ e $V_d = 0$. Como conseqüência, as componentes i_q e i_d da corrente do STATCOM, no referencial síncrono, estarão associadas, respectivamente, ao fluxo de potência ativa P e reativa Q , trocadas entre ele e o resto do circuito. Como a tensão gerada pela MI é função do fluxo de entreferro (2), e este depende do balanço de reativos do sistema, i_d é aqui empregada para controlar a magnitude da tensão terminal V da MI. Cabe realçar, entretanto, que a relação entre i_d e V é não linear, e também afetada pela demanda de reativos da carga. Isto complica muito o processo de sintonia dos ganhos de um regulador PI para o controle de V , pelas técnicas de controle clássico. Esta dificuldade foi contornada com o emprego de um controlador “Fuzzy”, o que será discutido na seção VI.

A parte superior da Figura 4 mostra a aquisição das tensões de linha e sua conversão para o referencial d^s-q^s (d-q estacionário), e o cálculo do valor de pico da tensão ($|V_s|$). Esse valor de pico é comparado com o valor de referência (V_S^*), sendo que o erro dessa comparação gera o valor de referência da corrente i_d^* .

A tensão do elo CC (V_{DC}) é usada como parâmetro para controle de fluxo de potência ativa entre o inversor e o restante do sistema, determinada pela corrente i_q . Isto pode ser compreendido pelo fato da potência instantânea no elo CC ser, a menos das perdas no inversor, igual à potência instantânea do lado CA. Conclui-se desta análise que $i_{DC} = k^* i_q$. Como i_{DC} determina a taxa de variação de V_{DC} , é pertinente derivar a referência i_q^* a partir do erro de V_{DC} .

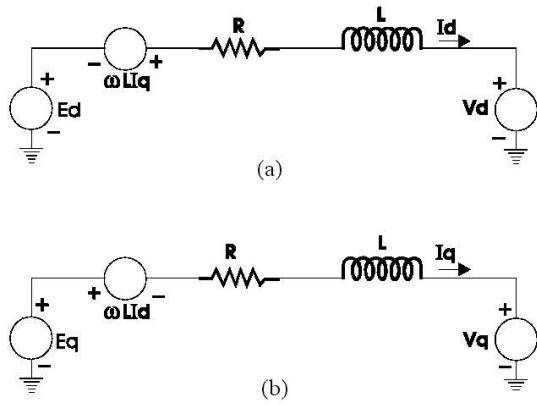


Fig. 5 Circuito de potência inversor-filtro-gerador.

É desejável que a tensão V_{DC} permaneça em seu valor nominal para que o inversor seja capaz de fornecer a potência reativa necessária para uma boa regulação da tensão terminal do GI.

A Figura 5 mostra o circuito de potência formado pelo inversor, pela MI e pelos indutores de filtro, no referencial d^c-q^c . O inversor é representado pelas tensões E_d e E_q e o gerador, pelas tensões V_d e V_q . L e R são, respectivamente, os valores de indutância e resistência dos indutores de filtro colocados entre o inversor e o gerador. O comportamento desse circuito pode ser descrito pelas equações seguintes.

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{E_q - \omega L i_d - R i_q - V_q}{L} \quad (3)$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{E_d + \omega L i_q - R i_d - V_d}{L}, \quad (4)$$

onde i_d e i_q são as correntes no circuito.

A partir das equações (3) e (4), pode-se deduzir que os valores de tensão de saída do inversor podem ser determinados por:

$$E_d^* = -\omega L i_q^* + \Delta E_d \quad (5)$$

$$E_q^* = V_q + \omega L i_d^* + \Delta E_q \quad (6)$$

onde pode-se observar os termos de pré-alimentação (*feed-forward*), bem como os derivados da ação dos controladores ΔE_d e ΔE_q . Estes são responsáveis pela compensação de eventuais variações de parâmetros e pela manutenção do valor de tensão quando da variação de carga.

Os vetores unitários podem ser obtidos com as seguintes equações [10]:

$$\cos(\theta_e) = \frac{v_{qs}^s}{|V_s|} \quad (7)$$

$$\text{sen}(\theta_e) = \frac{-v_{ds}^s}{|V_s|} \quad (8)$$

onde $|V_s| = \sqrt{v_{qs}^{s2} + v_{ds}^{s2}}$ é o valor de pico da tensão gerada.

Os valores de referência de tensão são transformados em sinais PWM que são enviados ao circuito de acionamento das

chaves do inversor. Dessa forma, o inversor funciona como um compensador de reativos capaz de manter constante o valor da amplitude da tensão gerada.

Embora a estratégia implementada tenha previsto apenas a regulação da tensão, e em particular num valor constante para V_S^* , é pertinente discutir duas alternativas de controle que são também atraentes. A primeira consiste em programar a tensão de referência V_S^* como uma função linear da corrente de carga ou frequência, prevendo que seja permitida uma variação limitada de V_S dentro de limites aceitáveis, por exemplo, entre 0,95 e 1,05 p.u. Esta ação seria benéfica para a operação de cargas tipo motores de indução, já que tenderia a manter o fluxo da máquina essencialmente constante. A outra opção seria uma regulação efetiva da frequência. Num segundo cenário, V_S^* seria mantida em seu valor nominal, enquanto o diagrama de blocos da Figura 4 seria modificado nos seguintes pontos:

- A vazão da turbina deve ser ajustada para atender a carga de ponta do sistema, como em [13];
- Uma malha de controle de frequência seria introduzida, cuja saída seria i_q^* ;
- A malha de controle de V_{DC} atuaria sobre a razão cíclica do chopper, garantindo que o excedente de potência para operação fora da ponta seja adequadamente dissipado pelo resistor R_P da Figura 3, como proposto em [15].

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Foi elaborado um modelo dinâmico do sistema proposto [17], usando apenas controladores PI, que foi simulado no software SimNon. O comportamento do sistema durante variações de carga de diferentes características foi analisado para que se comprovasse o funcionamento da topologia proposta. Alguns dos resultados obtidos são mostrados a seguir.

A variação do valor de pico da tensão nos terminais do gerador (V_S) e o comportamento da corrente i_d para o caso da aplicação de 2 degraus seguidos de carga pode ser observada na Figura 6. O primeiro degrau de carga foi aplicado em $t = 1,5s$ com o sistema operando à vazio, e se refere a uma carga resistiva de 0,25pu. O segundo degrau (de carga indutiva) foi aplicado em $t = 2,2s$, e elevou a carga total do sistema para 0,50pu com fator de potência de 0,7. Pode-se observar que a tensão terminal varia, mas é rapidamente trazida a seu valor de referência. Note-se que, no caso simulado, a potência reativa fornecida pelo banco de capacitores quando o GI opera a vazio é maior do que a necessária para fazê-lo operar sob tensão de referência. Por isso, o valor da corrente i_d antes do acionamento das cargas é negativo, o que significa que, no princípio, o inversor absorve potência reativa para manter o valor da tensão V_S em seu valor de referência. Quando a carga é acionada, a corrente i_d aumenta para aumentar a potência reativa na MI e manter o constante valor de V_S . Finalmente, o comportamento da corrente i_d demonstra que o inversor passa a fornecer a potência reativa extra exigida pela MI e pela carga.

A Figura 7 ilustra a variação da tensão gerada para uma fase (v_A), a corrente na mesma fase (i_A) e a velocidade mecânica da MI (N) para o caso de acionamento de uma

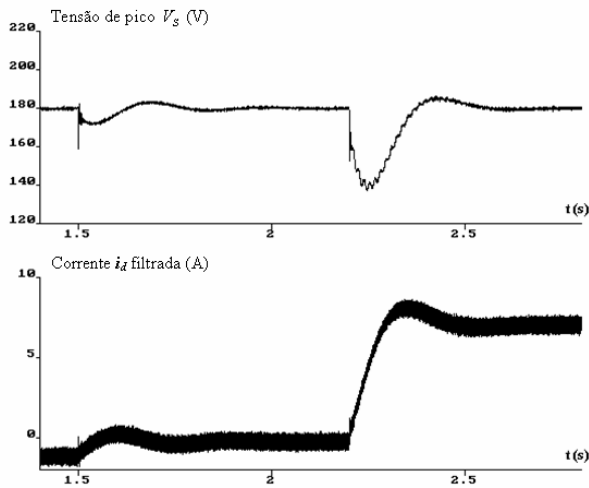


Fig. 6. V_S e i_d durante aplicação de dois degraus de carga.

carga indutiva de 0,5pu com fator de potência de 0,7 indutivo.

Nesse caso, o sistema precisa aumentar o fornecimento de potência reativa para a MI e fornecer a potência reativa demandada pela carga indutiva. Pode-se observar na figura que o comportamento é bastante satisfatório. Com o acionamento da carga (em $t = 1,5s$), a amplitude da tensão gerada cai, mas retorna ao seu valor de referência após alguns ciclos, assim permanecendo mesmo com a redução da velocidade mecânica da MI.

Vale ressaltar que em todos os casos simulados a variação da tensão no barramento CC do inversor (V_{DC}) foi mínima. Os resultados de simulação, portanto, comprovam a eficácia da topologia de controle proposta.

VI. CONTROLADOR FUZZY PARA O GERADOR DE INDUÇÃO

O controle “fuzzy” tem sido aplicado de forma vantajosa à área acionamento elétrico e eletrônica de potência há algum tempo, [18][19][20][21][22]. Este tipo de controle é bastante eficiente quando aplicado a sistemas que apresentam variação de parâmetros e não-linearidades [5], como é o caso da máquina de indução.

No sistema experimentado em laboratório os ganhos dos controladores PI foram determinados de forma heurística. Foi obtida uma faixa passante adequada para os controladores das malhas de corrente que geram as tensões ΔE_d e ΔE_q de referência. Entretanto, pelas razões já apresentadas na seção

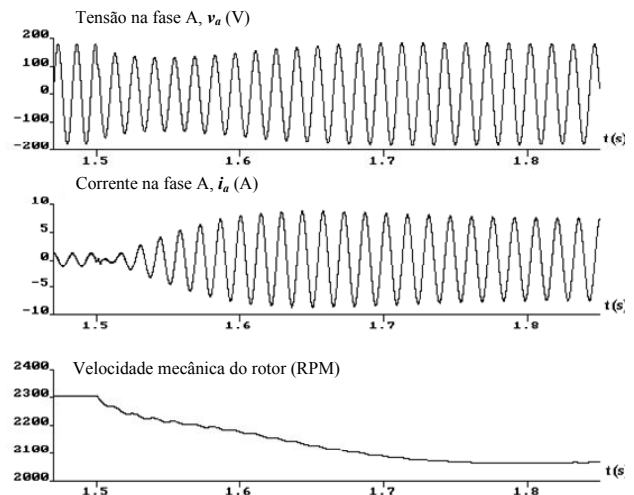


Fig. 7. v_A , i_A e velocidade da MI durante entrada da carga indutiva de 0,5 pu e $\text{fp} = 0,7$.

IV, não se conseguiu um ajuste satisfatório de ganhos para os controladores que geram os valores de referência das correntes i_d e i_q . Como um controlador “fuzzy” possibilita ajuste diferenciado para cada faixa de operação e permite que conhecimento qualitativo e conhecimento sobre o processo sejam facilmente incorporados à lógica de controle [5], optou-se por utilizar controladores “fuzzy” em substituição aos controladores PI das malhas de tensão V_S e V_{DC} . A substituição desses controladores permitiu que o sistema operasse de maneira estável e satisfatória numa faixa mais ampla, e que a tensão V_S fosse regulada de maneira mais eficiente. Deve ser ressaltado que a utilização de controladores “fuzzy” não representa incremento de custo nem de complexidade do sistema físico, por se tratar de uma modificação no programa de controle, apenas.

O controlador empregado, cuja estrutura está apresentada na Figura 8, é do tipo “Fuzzy-PI”, [23][24]. Este tipo de controlador tem como entradas os valores de erro (e) e de variação do erro (Δe) e, como saída, apresenta a variação da ação de controle (Δu). É necessário, portanto, promover a integração da saída do controlador para se obter o valor absoluto da ação de controle desejada. A base de regras para este controlador é apresentada na tabela I, e é norteada por três regras fundamentais [24]:

1. Se e e Δe forem nulos, não deve haver mudança no sinal de controle ($\Delta u = 0$);
2. Se e for não nulo e Δe for tal que o sistema tende

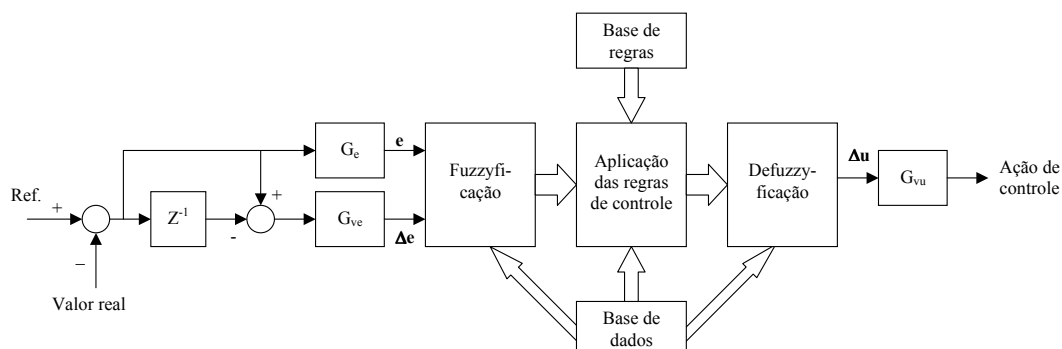


Fig. 8. Estrutura do controlador “fuzzy” implementado.

TABELA I
Base de Regras do controlador “Fuzzy” implementado

		e						
		NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
Δe	NG	NG	NG	NM	NM	NP	NP	ZE
	NM	NG	NM	NM	NP	NP	ZE	PP
	NP	NM	NM	NP	NP	ZE	PP	PP
	ZE	NM	NP	NP	ZE	PP	PP	PM
	PP	NP	NP	ZE	PP	PP	PM	PM
	PM	NP	ZE	PP	PP	PM	PM	PG
	PG	ZE	PP	PP	PM	PM	PG	PG

para o valor de referência a uma velocidade aceitável, então Δu deve ser nulo;

3. Se e for não nulo e Δe for tal que o sistema não tende para o valor de referência, ou tende para o valor de referência a uma velocidade indesejada, então Δu deve ser não nulo.

O universo de discurso das entradas e da saída foi dividido em sete conjuntos “fuzzy”, quais sejam: Negativo Grande (NG), Negativo Médio (NM), Negativo Pequeno (NP), Zero (ZE), Positivo Pequeno (PP), Positivo Médio (PM) e Positivo Grande (PG). As funções de pertinência dos conjuntos “fuzzy”, com valores normalizados, são apresentadas na Figura 9.

Para simplificação do algoritmo, os conjuntos das variáveis “fuzzy” são do tipo triangular com sobreposição de 50%. Os conjuntos triangulares não são simétricos e foram distribuídos de forma a aumentar a precisão do controlador quando as variáveis de entrada estão mais próximas de zero. O estilo de inferência do controlador “fuzzy” implementado é o “Mamdani”, ou SUP-MIN. O método de

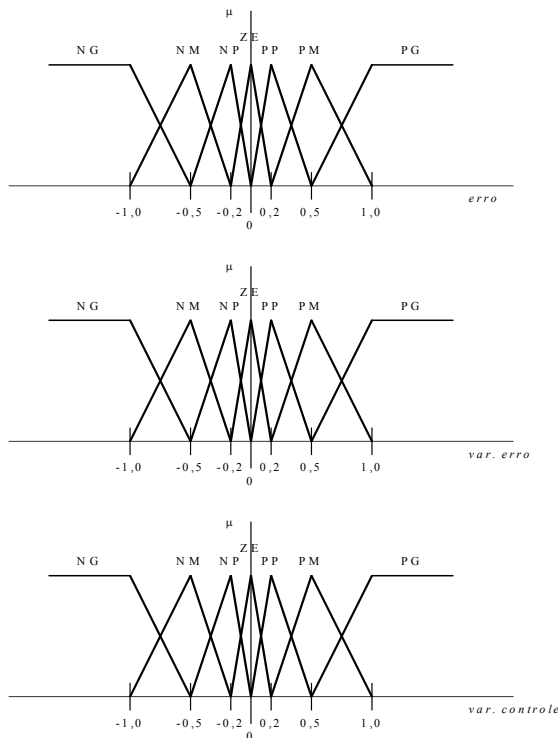


Fig. 9. Funções de pertinência dos controladores “Fuzzy” implementados.

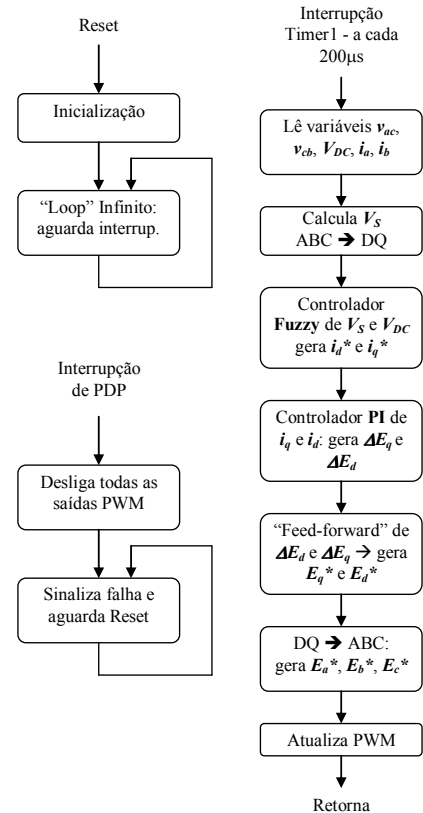


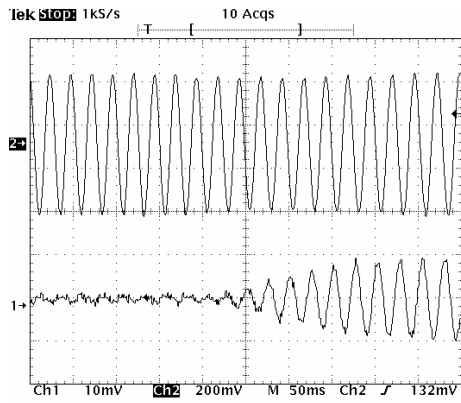
Fig. 10. Fluxograma do programa implementado no DSP.

“defuzzyficação” utilizado é o “método das alturas”, que produz resultado muito próximo do método do “centro de gravidade”, mas é menos complexo de ser implementado computacionalmente. A implementação dos controladores “Fuzzy” em linguagem assembly do DSP foi baseada na metodologia apresentada em [25].

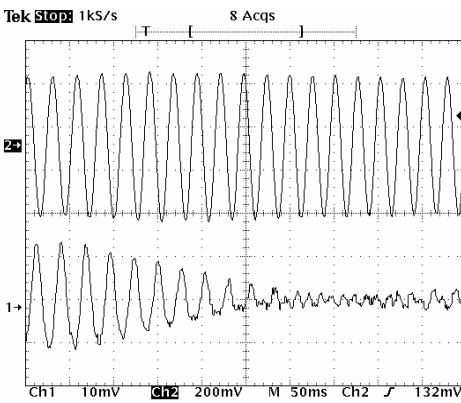
VII. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O programa de controle e o sistema como um todo foram implementados em laboratório. Controladores “fuzzy” foram usados nas malhas de V_S e V_{DC} , mantendo controladores PI nas malhas de i_d e i_q , conforme indicado na seção VI. A programação dos algoritmos de controle foi feita num DSP TMS320C240, da Texas Instruments, e obedece ao fluxograma mostrado na Figura 10. A rotina principal permanece num laço infinito, aguardando a ocorrência de uma das duas interrupções habilitadas: *Timer1*, que ocorre a cada 200µs, e *PDP* (*Power Drive Protection*), cujo sinal é ativado caso os circuitos de proteção detectem sobre-corrente ou sobre-tensão em qualquer das variáveis medidas. Em caso de falha os circuitos imediatamente desabilitam (por *hardware*) o acionamento dos IGBTs do inversor e enviam o sinal de *PDP*. A interrupção provoca a parada do programa.

A interrupção de *Timer1* marca o período de atualização dos tempos de chaveamento do PWM. Quando ela ocorre, o programa executa, em seqüência, todas as rotinas necessárias para obtenção dos valores das variáveis medidas, conversões, rotinas dos controladores, cálculo das tensões de referência e atualização dos tempos de chaveamento. Em seguida, retorna



(a)

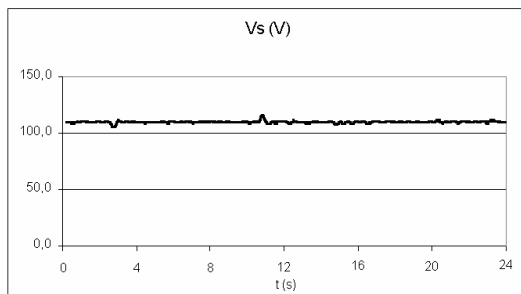


(b)

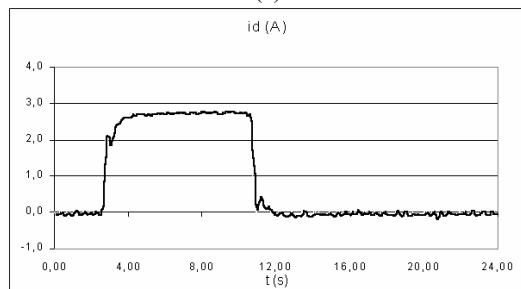
Fig. 11. v_{ab} e i_a durante acionamento (a) e desligamento (b) de carga resistiva de 0,25pu.

ao laço infinito e aguarda pela próxima chamada. Assim, os sinais de chaveamento são atualizados a cada 200 μ s.

O efeito da aplicação e retirada de uma carga de 0,25pu

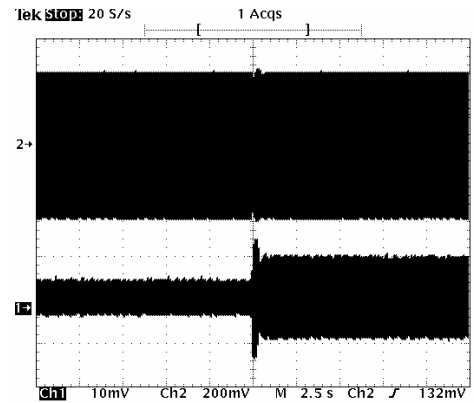


(a)

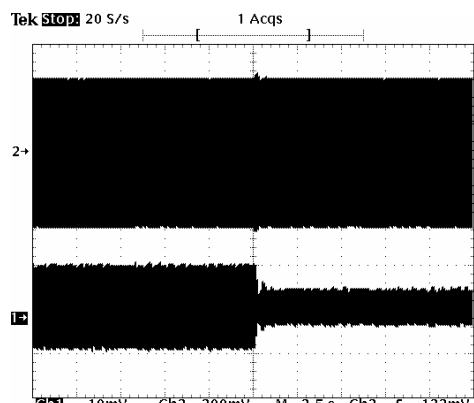


(b)

Fig. 12. Comportamento do sistema durante acionamento (a) e desligamento (b) de carga resistiva de 0,25pu.



(a)



(b)

Fig. 13. v_{ab} e i_a durante (a) partida direta e (b) desligamento de um motor de indução

sobre a tensão gerada e a correspondente corrente de fase fornecida pelo inversor pode ser visto na Figura 11. A figura mostra v_{ab} e i_a obtidas através de ponteiros de tensão e corrente. As escalas reais em todas as formas de onda são de 100V/divisão para tensão (canal 2) e de 2A/divisão para corrente (canal 1). Nota-se que a reação do sistema é bastante rápida (apenas alguns ciclos), e a variação na amplitude da tensão gerada é mínima.

Dados obtidos com uma placa de aquisição de dados permitiram a obtenção da variação da tensão gerada (V_s) e a correspondente variação da corrente i_a para a mesma situação anterior. A Figura 12 mostra que a corrente tem seu valor elevado rapidamente tão logo é detectada uma pequena variação na amplitude da tensão gerada. O sistema responde de forma igualmente rápida ao desligamento da carga.

A seguir é ilustrado o comportamento do sistema quando do acionamento de um motor de indução gaiola trifásico de 0,25cv à vazio, equivalente a uma carga de cerca de 0,1pu, $f_p=0,2$ em regime. A Figura 13 mostra a tensão v_{ab} e a corrente i_a durante o acionamento direto e desligamento do motor.

A Figura 14 ilustra a tensão v_{ab} e a corrente i_a durante o acionamento direto do mesmo motor, mas com uma escala de tempo distinta. Esta figura permite que se veja com mais detalhes o comportamento do sistema durante o acionamento da carga. Note-se que a carga é bastante mais severa durante a partida.

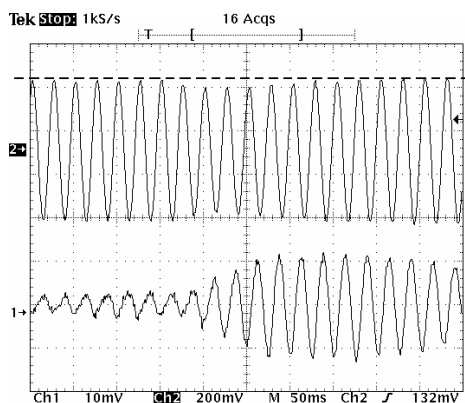


Fig. 14. v_{ab} e i_a durante partida direta de um motor de indução.

As formas de onda apresentadas mostram que o sistema é capaz de manter a tensão gerada em seu valor de referência, tanto durante o acionamento quanto durante o desligamento da carga indutiva.

VIII. CONCLUSÕES

O presente trabalho estudou um sistema de geração de energia elétrica que pode ser instalado em propriedades rurais ou pequenos povoados, e que pode funcionar de maneira independente do sistema interligado. O sistema estudado é capaz de alimentar cargas que não exijam tensão com frequência constante, como as que possuem retificador de entrada, cargas de iluminação, bombas de irrigação, etc. Alternativas de controle que limitam os efeitos da variação de frequência, ou que resultam numa operação sob frequência constante foram brevemente discutidas. A energia primária a ser aproveitada é de natureza hidráulica. A construção de pequenas centrais elétricas em áreas rurais afastadas pode significar economia na construção de longas linhas de transmissão. Estudos de simulação mostram que o tipo de controle proposto é viável e funciona a contento. Resultados experimentais provam que a técnica de controle proposta funciona e é rápida o suficiente de forma que a variação na amplitude da tensão gerada é pequena, mesmo com variação da velocidade da máquina primária ou com variação súbita de carga. O sistema se mostrou estável e eficiente, inclusive para o caso de partida direta de um motor de indução. A utilização de controladores “fuzzy” para controle do nível de tensão do GI se mostrou viável e extremamente atraente para aplicação em MCHs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Programa PROCEL. Eletrobrás. Disponível em: <http://www.eletrabras.com.br/EM_Programas_Procel/default.asp>. Acesso em 24 ago. 2006.

[2] Programa Luz no Campo. Eletrobrás. Disponível em: <<http://www.eletrabras.gov.br>>. Acesso em: 9 set. 2000.

[3] Programa Luz Para Todos. Eletrobrás. Disponível em: <<http://www.eletrabras.gov.br>>. Acesso em: 25 fev. 2006.

[4] M. G. Simões, F. Farret, *Renewable Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators*, CRC Press, 2004.

[5] S. Sandri, C. Correa, “Lógica Nebulosa”, *V Escola de Redes Neurais*, ITA, São José dos Campos, 1999.

[6] G. C. D. Sousa, F. N. Martins, J. P. Rey, J. A. Bruinsma, “An Autonomous Induction Generator System with Voltage Regulation”, *IEEE 2001 International Conference on Power Electronics and Power Systems – PEDS’01*, Indonesia, 2001.

[7] G. C. D. Sousa, F. N. Martins, “An Autonomous Fuzzy Controlled Induction Generator System with Voltage Regulation”, *Congresso Brasileiro de Automática – CBA*, Gramado, 2004.

[8] F. N. Martins, G. C. D. Sousa, “Controle Fuzzy do Gerador de Indução Trifásico para MCHs”. *XI CBE – Congresso Brasileiro de Energia*, Rio de Janeiro, 2006.

[9] D. E. Basset, M. F. Potter, “Capacitive Excitation for Induction Generators”. *AIEE Transactions*, v. 54, p. 540-543, 1935.

[10] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall PTR, 2001.

[11] W. Freitas, J. C. M. Vieira Jr., A. M. França, L. C. P. da Silva, V. F. da Costa, “Análise comparativa entre geradores síncronos e geradores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo para aplicação em geração distribuída”, *SBA Controle & Automação*, v.16, n.3, p. 332-344, 2005.

[12] R. Leidhold, G. Garcia, “Variable Speed Field-Oriented Controlled Induction Generator”, *IEEE – 33^o IAS Annual Meeting*, EUA, 1998.

[13] J. A. Pomilio, E. G. Marra, “Induction Generator Based System Providing Regulated Voltage with Constant Frequency”, *Anais do 5^o Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP’99*, v. 1, p. 94-99, 1999.

[14] C. F. Wagner, “Self-Excitation of Induction Motors”, *AIEE Transactions*, v. 58, p. 47-51, 1939.

[15] J. A. Pomilio, E. G. Marra, “Self-Excited Induction Generator Controlled by a VS-PWM Bi-Directional Converter for Rural Applications”, *APEC’98*, p. 116-122, Anaheim, EUA, 1998.

[16] E. G. Marra, J. A. Pomilio, “Sistemas de Geração Baseados em Gerador de Indução Operando com Tensão Regulada e Frequência Constante”, *SBA Controle & Automação*, v.11, n.1, p. 29-36, 2000.

[17] F. N. Martins, *Controle do Gerador de Indução Trifásico Baseado em Lógica “Fuzzy”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFES, 2003.

[18] J. M. Araújo, *Controle de Posição de um Motor de Indução Trifásico através de Lógica “Fuzzy”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFES, 2003.

[19] M. G. Simões, *Fuzzy Logic and Neural Network Based Advanced Control and Estimation Techniques in Power Electronics and AC Drives*, Tese de Doutorado, University of Tennessee, Knoxville, EUA, 1995.

[20] G. C. D. Sousa, B. K. Bose, “A Fuzzy Set Theory Based Control of a Phase-Controlled Converter DC Machine

- Drive”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, v. 30, n°1, 1994.
- [21] G. C. D. Sousa, B. K. Bose, J. G. Cleland, “Fuzzy Logic Based On-line Efficiency Optimization Control of an Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive”, *IECON-93*, Hawaii, EUA, 1993.
- [22] G. C. D. Sousa, *Application of Fuzzy Logic for Performance Enhancement of Drives*, Tese de Doutorado, University of Tennessee, Knoxville, EUA, 1993.
- [23] B. S. Moon, “Equivalence between fuzzy logic controllers and PI controllers for single input systems”. *Elsevier Science - Fuzzy Sets and Systems*, 69, p. 105-113, 1995.
- [24] K. L. Tang, R. J. Mulholland, “Comparing Fuzzy Logic with Classical Controller Designs”, *IEEE Trans. On Systems Man and Cybernetics*, v. SMC 17, n° 6, p. 1085-1087, 1987.
- [25] G. C. D. Sousa, B. K. Bose, M. G. Simões, “A Simulation-Implementation Methodology of a Fuzzy Logic Based Control System”, *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, v.2, n° 1, p. 61-68, 1997.

DADOS BIOGRÁFICOS

Felipe Nascimento Martins, nascido em 07/10/1975 em Vitória, ES, é engenheiro eletricista (1999) e mestre em

Engenharia Elétrica - Automação (2003) pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Atuou, de 2001 a 2005, como engenheiro da empresa Automatica Tecnologia S.A. Atualmente é professor da UCL - Faculdade do Centro Leste, e está cursando o doutorado em Engenharia Elétrica - Automação, na UFES. É membro da ISA.

Suas áreas de interesse são: sistemas de controle eletrônicos, acionamentos de máquinas elétricas, automação e robótica.

Gilberto Costa Drumond Sousa, nascido em 05/10/1958 em Faria Lemos, MG, é engenheiro eletricista (1982) pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Mestre em Engenharia Elétrica (1986) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e Ph.D. em Engenharia Elétrica (1993) pela Universidade do Tennessee, Knoxville, EUA.

Ele é professor titular da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), onde tem desenvolvido atividades de ensino, pesquisa e administração. É membro da SOBRAEP, e do IEEE – Industry Application Society.

Suas áreas de interesse de pesquisa compreendem controle fuzzy, máquinas e acionamentos elétricos, e qualidade de energia.