

CONTROLE DE FREQUÊNCIA E TENSÃO DE MICRO CENTRAIS HIDRELÉTRICAS QUE UTILIZA GERADORES DE INDUÇÃO AUTO-EXCITADOS COM EMPREGO DA MODELAGEM NÃO-LINEAR DE TURBINAS HIDRAÚLICAS

Lucas Giuliani Scherer e Robinson Figueiredo de Camargo

Universidade Federal de Santa Maria

Departamento de Processamento de Energia Elétrica, Grupo de Eletrônica de Potência e Controle

CEP: 97105-900 – Santa Maria, RS – Brasil

e-mails: lgscherer@gmail.com, robinson@gepoc.ufsm.br

Resumo – Este artigo apresenta a modelagem e controle de frequência e tensão de microcentrais hidrelétricas aplicadas a geradores de indução auto-excitados. Para o controle de frequência da turbina hidráulica foi considerada a modelagem não-linear aplicada a esse tipo de turbina e o emprego de um regulador de velocidade para a máquina primária com características de um controlador do tipo proporcional-derivativo. O controle de tensão é realizado através de um inversor alimentado em tensão com modulação por largura de pulso. O inversor PWM opera como um compensador estático de reativos, que absorve ou injeta energia reativa no sistema de acordo com a carga para regular as tensões nos terminais do gerador de indução. Todo o sistema de controle proposto é implementado digitalmente utilizando processador digital de sinais. Resultados de simulação e experimentais são obtidos para demonstrar o impacto do sistema de controle completo proposto durante variações de carga e de referência tanto no controle de frequência quanto no controle de tensão, onde a partir destes resultados é possível observar o adequado desempenho do sistema de controle proposto.

Palavras-Chave – Microcentrais hidrelétricas, gerador de indução auto-excitado, controle de frequência e tensão, modelagem não linear.

FREQUENCY AND VOLTAGE CONTROL OF MICRO HYDRO POWER STATIONS APPLIED ON AUTO EXCITED INDUCTION GENERATORS BASED ON HYDRAULIC TURBINE'S NONLINEAR MODEL

Abstract – This paper presents an approach to modeling and control of micro hydro power stations applied on induction generators. To control the frequency of the turbine it was considered non-linear modeling applied to this type of turbine and the use of a speed regulator for the primary machine having the characteristics of a proportional-derivative controller (PD). Voltage control is performed through a voltage fed inverter with pulse width modulation (PWM). The PWM inverter operates as a reactive static compensator absorbing or injecting reactive power in the system according to the load connected on its terminal to regulate the voltage at the terminals of the induction generator. The proposed control system is implemented digitally using a digital signal processor (DSP). Simulation and experimental results are obtained in order to demonstrate

the impact of the complete control system proposed during load and reference variations in the frequency and voltage control, where from these results it is possible to observe the proper performance of the control system proposed.

Keywords – micro hydro power stations, auto excited induction generators, frequency and voltage control.

NOMENCLATURA

GIAE - geradores de indução auto-excitados.

PI - controlador do tipo proporcional-derivativo.

PWM – modulação por largura de pulso.

DSP - processador digital de sinais.

P_m - Potência mecânica.

T_m - Torque mecânico.

T_e - Torque elétrico.

P_m - Potência mecânica.

P_e - Potência elétrica.

P_L - Potência elétrica da carga.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o interesse em geração distribuída e sistemas de geração baseados em energia renovável, tais como energia hidráulica, eólica, solar, biomassa entre outros, vem crescendo consideravelmente.

Inúmeras razões podem ser apontadas para o interesse nestas fontes de energia, dentre estas se destacam [1]:

- Crescente demanda de energia por parte dos países desenvolvidos e em desenvolvimento;
- Provável escassez futura de combustíveis fósseis;
- Problemas com o gerenciamento de resíduos provenientes de energia nuclear e recentes acidentes ocorridos na Rússia e Japão;
- Crescente preocupação com relação à emissão de poluentes e as mudanças climáticas.

De acordo com um estudo conduzido pelo Laboratório Americano de Energias Renováveis, se nada for feito, estima-se que a emissão de carbono, por exemplo, pelos Estados Unidos aumente dos atuais 1700 milhões de toneladas de carbono (Mtc) por ano para 2300 Mtc no ano de 2030. No mesmo estudo, foi demonstrado que através da implementação de programas de eficiência energética e do uso de fontes de energia renováveis, seria possível não

apenas frear esse aumento na emissão de carbono, mas efetivamente reduzi-lo para valores inferiores a 1000 Mtc até 2030 [2].

A nível nacional as projeções de consumo de energia elétrica apontam para a necessidade de investimentos maciços em um curto prazo para a ampliação da planta de geração de energia elétrica no Brasil. O racionamento de energia elétrica ocorrido no ano de 2001 e início de 2002, passou a motivar muitos investimentos na área de geração e transmissão de energia elétrica [3] e [4].

Ao contrário do panorama mundial, no Brasil a contribuição da energia hidráulica na matriz energética nacional, segundo o Balanço Energético Nacional (2011) – ano base 2010 [5], é da ordem de 14 %, participando com 74% de toda a energia elétrica gerada no País. Esta ampla participação da energia hidráulica no cenário brasileiro é histórica e se mantém praticamente a mesma há décadas.

Apesar da tendência de aproveitamento de outras fontes de energia, devido a restrições ambientais e socioeconômicas de projetos hidrelétricos e aos avanços tecnológicos no aproveitamento de fontes não-convencionais, tudo indica que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil. Estima-se que muito ainda pode ser feito para expandir o parque hidroelétrico, já que menos de 30% é aproveitado [6].

Outra barreira importante a ser vencida no Brasil está ligada ao acesso de energia a toda a população. Segundo dados do Programa Luz no Campo, da Eletrobrás, a eletrificação rural no Brasil é ainda bastante deficiente no que se refere ao percentual de propriedades atendidas. Isto é decorrência do alto custo de instalação e manutenção de redes rurais de transmissão e distribuição de energia, devido principalmente as grandes distâncias, a baixa densidade de cargas e a reduzida demanda [4]. Segundo a legislação atual, as concessionárias de energia têm prazo até dezembro de 2015 para eletrificar todos os domicílios sem acesso à energia no Brasil [7].

Por essas razões, e seguindo a tendência mundial no ramo da energia, as políticas de estímulo têm incentivado a aplicação de sistemas de geração distribuída (SGD) e os esforços no campo do desenvolvimento de fontes de energias renováveis, buscando soluções de cunho regional para o uso de fontes renováveis de energia na matriz energética nacional [8].

Destaque especial vem sendo dado à pesquisa de tecnologias no âmbito de pequenas centrais hidrelétricas, eólica, sistemas fotovoltaicos, biomassa, entre outras, sendo previsto que estas tecnologias serão responsáveis por uma maior fatia no balanço energético mundial nas próximas décadas.

Entre estas fontes de energia renováveis destacam-se a construção de novas centrais hidrelétricas de energia elétrica, podendo estas serem classificadas em Micro Centrais Hidrelétricas (μ CH's até 100 kW), Mini Centrais Hidrelétricas (MCH's, de 100 kW até 1 MW) e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's – de 1 MW até 30 MW) [6].

Enquanto as PCH's podem ser caracterizadas como empreendimentos a partir do momento em que o excedente de energia elétrica gerada pode ser comercializado, as μ CH's

destinam-se ao aproveitamento local na propriedade rural ou comunidades.

Em termos tecnológicos, os sistemas de geração empregando geradores síncronos (GS) são os mais aplicados na geração hídrica. As características dos geradores síncronos associados à alta eficiência da máquina e dos sistemas de controle podem ser aplicados a todas as faixas de geração [9], entretanto, em baixas potências, como é o caso de μ CH's, esses geradores podem representar um custo elevado se comparado com outros tipos de máquinas.

Uma alternativa ao uso do GS seria a utilização de geradores de indução (GI), os quais podem representar uma solução de menor custo. Estudos comparativos mostram significantes vantagens econômicas para o sistema de geração usando geradores de indução em comparação a geradores síncronos para μ CH's [10].

Além disso, o uso de geradores de indução com rotor gaiola de esquilo é atrativo para micro geração em áreas isoladas, devido a sua robustez, auto-proteção contra sobrecarga e pela sua elevada densidade de potência (W/kg) e reduzida manutenção [11-12]. Por outro lado, a frequência e a amplitude das tensões de saída de um gerador de indução auto-excitado (GIAE) dependem da carga [13] necessitando uma adequada regulação dessas grandezas.

Inúmeros trabalhos discutem a operação isolada de geradores de indução e a regulação de frequência e tensão, com o uso de um controle eletrônico de carga para consumo do excesso de potência [14-16], ou mesmo a conexão de conversores para conexão a uma rede monofásica para drenar o excesso de potência e com isso manter a frequência constante pelo controle de potência ativa [11]. Tais soluções tem como vantagem o baixo custo do sistema a ser implementado. Entretanto, tais aplicações restringem-se a condições suficientes de armazenamento de água em reservatórios [17], sem levar em conta a sazonalidade de condições climáticas, já que não controlam a vazão da água.

Neste sentido, este artigo utiliza-se do modelamento não linear de turbinas hidráulicas [18] e de um regulador de velocidade [9], porém com emprego em uma nova aplicação voltado a geradores de indução auto-excitados. Nesta aplicação os próprios parâmetros da planta implicam numa redefinição dos parâmetros do regulador de velocidade, cuja variável a ser regulada passa a ser a frequência do estator do gerador. A atuação pode então ser realizada no distribuidor do sistema de geração, por meio de uma servo-válvula e um servo-motor, que por sua vez atuam no controle da vazão da água sobre a turbina. Como vantagem este sistema pode ser aplicado em sistemas de microgeração onde seja possível controlar a vazão da água e evitar que em períodos de escassez de água este sistema deixe de operar. Como desvantagens, os custos relativos ao kW/h com o uso destas tecnologias tendem a aumentar, porém nada se compara a falta de energia elétrica, a qual a sociedade atual está estritamente dependente.

O controle da amplitude das tensões do estator é realizado através de um inversor PWM alimentado em tensão e controladores proporcionais-integrais (PI). O inversor PWM opera como um compensador estático de reativos, que absorve ou injeta energia reativa no sistema de acordo com a carga para regular as tensões nos terminais do gerador de

indução. Todo o sistema de controle proposto é implementado digitalmente utilizando um DSP TMS320F28335 da Texas Instrument Inc., o qual apresenta vantagens uma adequada velocidade de processamento e operação em ponto flutuante. Resultados de simulação e experimentais são apresentados para demonstrar a aplicabilidade da modelagem considerada e do projeto dos controladores utilizados. Além disso, demonstram o impacto no sistema de controle completo proposto durante variações de carga e de referência tanto no controle de frequência quanto no controle de tensão. Tais resultados apresentaram um adequado desempenho do sistema de controle proposto, validando o emprego dos controladores considerados no caso do GIAE.

O trabalho está organizado da seguinte forma: a seção II apresenta a descrição da modelagem não-linear da turbina hidráulica e a modelagem do sistema composto por inversor PWM, capacitores de excitação e gerador de indução. Na seção III é apresentado o projeto dos controladores aplicados no sistema completo, com regulador de velocidade para o controle de frequência e regulação de tensão do GIAE utilizando inversor PWM e seu sistema de controle, além disso, resultados de simulação são obtidos. Na seção IV é apresentado o sistema implementado a partir de um protótipo, desenvolvido em laboratório, em escala de potência reduzida (4 kW), e obtenção de resultados experimentais que validam a modelagem e os controladores utilizados, bem como o sistema completo de micro geração proposto para a aplicação em GIAE.

II. MODELAGEM DO SISTEMA DE GERAÇÃO

O sistema de geração proposto é apresentado na Figura 1 e representa um sistema completo de micro geração de energia. A modelagem deste sistema inclui a turbina hidráulica, o GIAE, os capacitores de excitação e o inversor PWM, onde no caso do GIAE, a fim de simplificar a modelagem, esse foi considerado como uma fonte de tensão equilibrada e sem distorções.

A seguir será descrito a modelagem do sistema considerado.

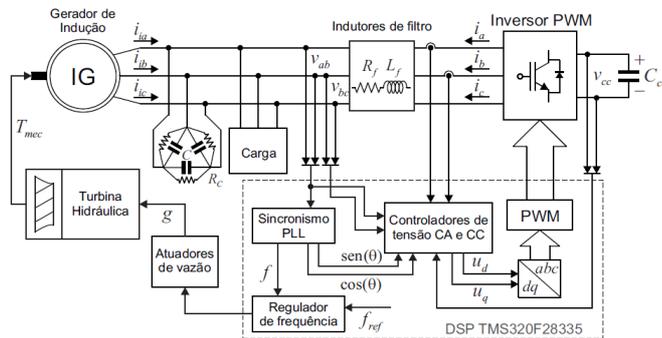


Fig. 1. Diagrama esquemático do sistema proposto para o controle da microcentral hidrelétrica.

A. Modelagem do Sistema Hidráulico

Para o modelamento do sistema hidráulico, representado na Figura 2, foi considerado o modelo não linear adequado a grandes variações de carga e frequência. Para a obtenção do

modelo, as seguintes hipóteses simplificadoras são consideradas [17], [18] e [9]:

- A resistência hidráulica é insignificante;
- O conduto é inelástico e a água é incompressível;
- A velocidade da água varia diretamente com a abertura do distribuidor e com a raiz quadrada da altura da coluna d'água;
- A potência gerada pela turbina é diretamente proporcional à altura da coluna d'água e ao volume de vazão.

Com base nestas considerações, as características da turbina e represa podem ser determinadas pelas equações básicas da hidrodinâmica:

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (1)$$

$$P = K_p H U \quad (2)$$

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{a_g}{L} (H - H_0) \quad (3)$$

$$Q = AU \quad (4)$$

Onde:

U - Velocidade da água no conduto forçado.

G - Abertura ideal do distribuidor.

H - Altura da coluna d'água, da superfície do reservatório até o distribuidor da turbina.

P - Potência total da turbina.

L - Comprimento do conduto.

a_g - Aceleração da gravidade.

K_u, K_p - Constantes de proporcionalidade.

H_0 - Valor inicial de H .

Q - Taxa de vazão da água.

A - Seção transversal do conduto.

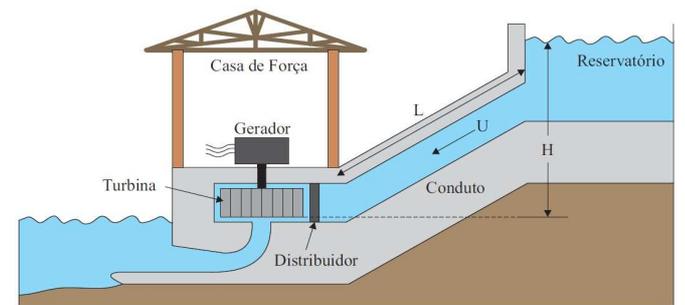


Fig. 2. Esquema básico de uma planta hidrelétrica.

Uma vez que o interesse está no desempenho do sistema a grandes distúrbios, normalizando as equações (1-4) com relação a valores base (valores nominais de operação), é possível obter, as seguintes equações:

$$\frac{U}{U_b} = K_u \frac{G}{G_b} \sqrt{\frac{H}{H_b}} \quad (5)$$

$$\frac{P}{P_b} = K_p \frac{H}{H_b} \frac{U}{U_b} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{U}{U_b} \right) = -\frac{a_g}{L} \frac{H_b}{U_b} \left(\frac{H}{H_b} - \frac{H_0}{H_b} \right) \quad (7)$$

Onde:

b - Notação de grandezas em valores base.

Reescrevendo as equações (5) e (7), sendo que, na equação (7) é substituído d/dt pelo operador s , usando a notação de *Laplace*, tem-se:

$$H_n = \left(\frac{U_n}{G_n} \right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{U_n}{H_n - H_{0n}} = -\frac{1}{T_w s} \quad (9)$$

$$T_w = \frac{LU_b}{a_g H_b} \quad (10)$$

Onde:

T_w - Tempo de partida da água em condições nominais de operação.

n - Grandezas normalizadas.

Agora, considerando que a potência mecânica na saída da turbina é definida por:

$$P_m = P - P_L \quad (11)$$

$$P_L = U_{SC} H \quad (12)$$

Onde:

P_L - Perdas de potência totais da turbina.

U_{SC} - Velocidade da água no conduto forçado em condição sem carga.

Então, fazendo uso da equação (6) e da mesma forma normalizando a potência mecânica em seus valores base, tem-se:

$$\frac{P_m}{P_b} = \frac{P}{P_b} - \frac{P_L}{P_b} = \left(\frac{U}{U_b} - \frac{U_{SC}}{U_b} \right) \frac{H}{H_b} \quad (13)$$

Ou ainda:

$$P_{mn} = (U_n - U_{SCn}) H_n \quad (14)$$

Para a solução da equação de escorregamento da máquina é obtido o torque mecânico, o qual será normalizado em função de seus valores base, assim:

$$T_{mn} = \frac{\omega_0}{\omega} P_{mn} \left(\frac{P_b}{MVA_b} \right) = \frac{1}{\omega_n} (U_n - U_{SCn}) H_n P_{bn} \quad (15)$$

Onde:

ω_n - velocidade angular da turbina em p.u.

MVA_b - MVA base associado ao torque da turbina.

P_{bn} - taxa (MW da turbina/ MVA_b).

Até então foi considerado o valor ideal de abertura do distribuidor (G), entretanto, considerando agora uma relação

entre G e o valor real de abertura da turbina (g) [18], e ainda considerando seus valores em p.u., é possível obter uma relação entre G e g dada por:

$$G_n = A_t g_n \quad (16)$$

Onde A_t é o ganho da turbina dado por:

$$A_t = \frac{1}{g_{nPC} - g_{nSC}} \quad (17)$$

Onde:

g_{nPC} - abertura real do distribuidor em p.u. a plena carga.

g_{nSC} - abertura real do distribuidor em p.u. sem carga.

As equações (8), (10), (15) e (17) descrevem completamente as características da coluna d'água e da turbina, as quais podem ser representadas no diagrama de blocos da Fig. 3. Tais equações são base para o projeto de reguladores associados ao controlador de frequência que serão apresentados na próxima seção.

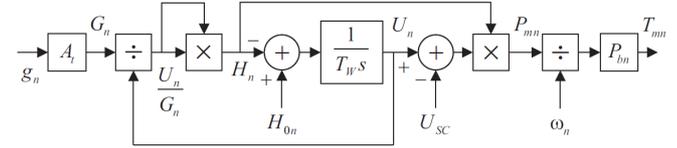


Fig. 3. Modelo não-linear do sistema hidráulico.

A seguir será apresentada a modelagem dos atuadores de vazão responsável pela abertura e fechamento do distribuidor da turbina.

1) *Modelagem dos Atuadores de Vazão* - O conjunto de atuadores representa uma parte importante no conjunto hidráulico, sendo responsável pela abertura e fechamento do distribuidor da turbina. Associado a um sistema de controle dedicado, é responsável pelo controle da potência ativa gerada pelo sistema de geração, uma vez que controla a vazão de água na turbina e por consequência, a potência mecânica fornecida em seu eixo.

Sistemas de controle mais antigos eram realizados usando componentes puramente mecânicos e hidráulicos [18]. Mais recentemente, com o avanço das tecnologias, estes sistemas de controle passaram a empregar componentes eletro-hidráulicos. Apesar desta mudança, a forma de operação manteve-se similar, com a vantagem de oferecer maior flexibilidade e ganho de desempenho com relação a zonas mortas e atrasos de respostas. Assim, optou-se por adotar um esquema de atuadores semelhante ao apresentado em [17] e [18], e posteriormente adotado em [9] a nível de simulação na representação de um sistema real.

O sistema é constituído por uma servo-válvula hidráulica e um servo-motor. A servo-válvula é comandada por sinais elétricos provenientes do regulador, controla o sentido e o fluxo de fluido hidráulico; o servo-motor, de acordo com esse fluxo, comanda diretamente os movimentos do distribuidor da turbina [9]. O sistema de controle pode ser representado pela seguinte função de transferência:

$$G_{amador}(s) = \frac{g}{u} = \frac{K_a}{T_G s^2 + s} \quad (18)$$

Onde:

- K_a - Ganho dos atuadores.
- T_G - Constante de tempo do servo-motor.
- u - Sinal de controle.

A seguir será descrito a modelagem do sistema elétrico composto por GIAE, capacitores de excitação e inversor PWM.

B. Modelagem do Sistema Elétrico

Para a modelagem do sistema elétrico composto por GIAE, capacitores de excitação e inversor PWM, apresentados na Figura 1, as seguintes hipóteses simplificadoras serão consideradas:

- O gerador de indução é considerado uma fonte de tensão ideal, equilibrada e sem distúrbios.
- O capacitor associado ao barramento CC do inversor PWM é considerado uma fonte de tensão ideal.
- As indutâncias, do filtro de saída do inversor são idênticas e de mesmo valor.

Com base nestas hipóteses, um diagrama do circuito elétrico do sistema é apresentado na Figura 4.

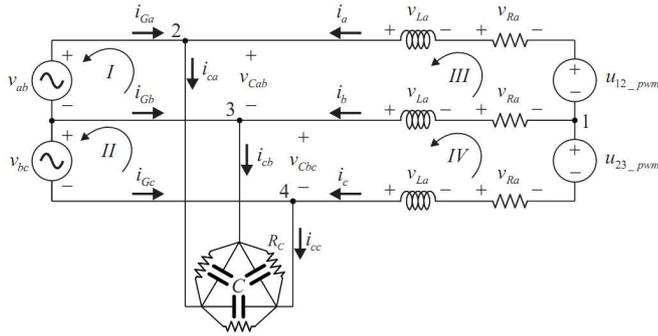


Fig. 4. Diagrama do circuito elétrico associado ao sistema considerado.

Agora, aplicando as leis de *Kirchhoff* das tensões e correntes nas malhas do circuito da Figura 4, é possível a representação por espaço de estado desse sistema, conforme as seguintes equações:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_{abc} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_{abc} \mathbf{u}(t) + \mathbf{F}_{abc} \mathbf{w}(t) \quad (19)$$

Onde:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{1pwm} \\ u_{2pwm} \\ u_{3pwm} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} i_{Ga} \\ i_{Gb} \\ i_{Gc} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{abc} = \begin{bmatrix} \frac{R_f}{L_f} & 0 & 0 & \frac{2}{3L_f} & \frac{-1}{3L_f} & \frac{-1}{3L_f} \\ 0 & \frac{R_f}{L_f} & 0 & \frac{-1}{3L_f} & \frac{2}{3L_f} & \frac{-1}{3L_f} \\ 0 & 0 & \frac{R_f}{L_f} & \frac{-1}{3L_f} & \frac{-1}{3L_f} & \frac{2}{3L_f} \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & \frac{-1}{CR_C} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & \frac{-1}{CR_C} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & \frac{-1}{CR_C} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{abc} = \frac{1}{3L_f} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F}_{abc} = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

A partir das equações de espaço de estados em coordenadas estacionárias abc em (19), fazendo uso de matrizes de transformações apropriadas em eixos síncronos, é possível decompor o sistema original em um sistema normalizado, composto de apenas dois eixos, direto e quadratura, e eliminar os termos variantes no tempo. Logo, obtém-se uma representação em espaço de estados em coordenadas girantes dq dadas por:

$$\dot{\mathbf{x}}_{dq}(t) = \mathbf{A}_{dq} \mathbf{x}_{dq}(t) + \mathbf{B}_{dq} \mathbf{u}_{dq}(t) + \mathbf{F}_{dq} \mathbf{w}_{dq}(t) \quad (20)$$

Onde:

$$\mathbf{x}_{dq} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u}_{dq} = \begin{bmatrix} u_{d-pwm} \\ u_{q-pwm} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{w}_{dq} = \begin{bmatrix} i_{Gd} \\ i_{Gq} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{dq} = \begin{bmatrix} \frac{R_f}{L_f} & -\omega & \frac{Z_{base}}{L_f} & 0 \\ \omega & \frac{R_f}{L_f} & 0 & \frac{Z_{base}}{L_f} \\ \frac{1}{CZ_{base}} & 0 & \frac{-1}{CR_C} & -\omega \\ 0 & \frac{1}{CZ_{base}} & \omega & \frac{-1}{CR_C} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{dq} = \frac{Z_{base}}{L_f} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F}_{dq} = \frac{1}{CZ_{base}} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

sendo:

R_c - resistência associada aos capacitores de auto-excitação.

R_f - resistência associada aos indutores de filtro.

$Z_{base} = V_{base} / I_{base}$ - impedância base.

i_d, i_q - correntes do inversor PWM em eixos dq .

v_d, v_q - tensão no ponto de conexão em eixos dq .

u_{d_pwm}, u_{q_pwm} - tensões na saída do inversor PWM em eixos dq .

i_{Gd}, i_{Gq} - correntes no GIAE em eixos dq .

Com base nas equações que descrevem a planta em questão e usando um método de discretização apropriado, a seguir serão descritos os projetos dos reguladores associados ao controle de frequência e tensão do sistema considerado.

III. PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para efeito de análise das características e comportamento do sistema a diferentes condições de operação e, principalmente auxílio no projeto dos controladores, o sistema proposto foi desenvolvido em um ambiente próprio de simulação do software Matlab[®]. Neste ambiente, a planta completa do sistema, incluindo sistema hidráulico, elétrico e controle, é representada através de diagramas de blocos, cujos blocos são definidos a partir das equações matemáticas que modelam a planta, ou o uso de blocos pré-definidos neste ambiente.

Para explicar o projeto do sistema de controle, este será dividido em duas partes: uma relativa ao controle de frequência e a outra referente ao controle de tensão.

1) Projeto do Controle de Frequência do Sistema

A frequência é diretamente dependente da velocidade de operação do gerador, estando relacionada ao balanço de potência ativa do sistema. O princípio do controle está na realimentação da medida de frequência, ou variável relacionada, tal como velocidade da máquina primária [9, 14, 20, 21], para o controle da abertura do distribuidor, conforme Figura 5.

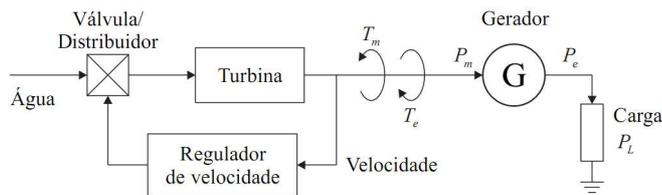


Fig. 5. Diagrama de blocos da concepção básica de um controlador de velocidade considerando um sistema de geração isolado.

Uma eventual mudança de carga é refletida instantaneamente em uma mudança no torque elétrico T_e do gerador. Isto causa uma diferença entre o torque mecânico T_m proveniente da turbina e o torque elétrico T_e , o que resulta em variação de velocidade, conforme determinado pela função de transferência dada por:

$$\Delta\omega_r = \frac{T_m - T_e}{2Hs} \quad (21)$$

Onde:

s - Operador de Laplace.

H - Constante de inércia (kg.m²).

$\Delta\omega_r$ - Variação da velocidade rotórica (pu).

A partir da equação (21) é possível verificar que a velocidade do conjunto gerador está diretamente relacionada com o torque mecânico, e conseqüentemente com a potência mecânica desenvolvida pela turbina hidráulica.

A turbina hidráulica é um sistema de fase não-mínima [22]. Esta característica influi diretamente no projeto de um regulador de frequência, uma vez que representa uma característica dinâmica da planta a qual deve ser considerada. Assim, para um desempenho estável do controlador, a função de transferência do regulador de frequência deverá possuir uma constante de tempo que retarde seu sinal de saída (sinal de controle), e conseqüentemente, a atuação do distribuidor, até que a resposta inversa da potência já tenha se extinguido.

Foi considerada então, a função de transferência apresentada em [17] para o regulador de frequência dada por:

$$C_{freq}(s) = R_T \frac{sT_R}{1 + sT_R} \quad (22)$$

Onde:

R_T - Ganho transitório.

T_R - Tempo de reset.

A disposição do regulador de frequência em relação aos atuadores [9] é mostrada no diagrama de blocos da Figura 6. Onde ω_{ref} e ω são a velocidade angular de referência do gerador em p.u. e sua velocidade angular real, também em p.u., respectivamente.

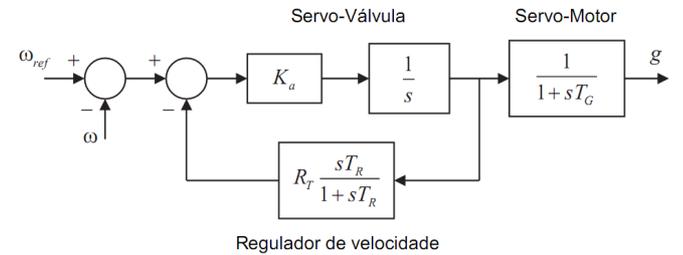


Fig. 6. Diagrama de blocos do regulador de velocidade em conjunto com os atuadores da turbina hidráulica.

Este diagrama de blocos pode ser simplificado, alocando-se o regulador não mais na malha de realimentação, e sim na malha direta [9], conforme a Figura 7.

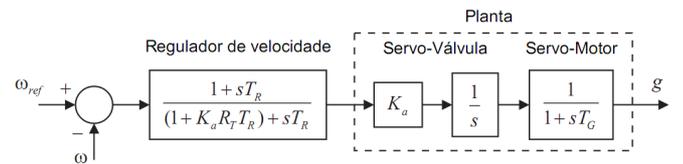


Fig. 7. Diagrama em blocos do regulador de velocidade na malha direta.

Esta função de transferência (FT) do controlador em malha direta tem as características de um controlador proporcional-derivativo (PD), podendo então ser substituída pela seguinte FT:

$$C_{PD}(s) = K_p + \frac{K_D s}{1 + Ns} \quad (23)$$

sendo,

- K_p - Ganho proporcional.
- K_D - Ganho derivativo.
- N - Constante de tempo derivativo.

Considerando a ação integradora presente na FT dos atuadores, o emprego de um controlador PD atende as necessidades de regulação em regime transitório. Para o projeto dos ganhos do controlador, faz-se necessário o conhecimento dos parâmetros da planta hidráulica, especialmente os parâmetros dos atuadores. A Tabela I apresenta os parâmetros considerados para os atuadores da planta hidráulica.

TABELA I
Parâmetros dos atuadores considerados para o projeto do controlador de velocidade

Parâmetro	Valor
K_a	8
T_G	0,01

A Figura 8 apresenta resultados de simulação comparando as respostas de abertura do distribuidor e de torque mecânico da turbina, considerando os parâmetros definidos na Tabela II. Por esta figura percebe-se uma relação direta entre a potência mecânica e a abertura do distribuidor, ou seja, ambos apresentam curvas semelhantes, divergindo apenas em amplitude devido à característica de fase não mínima da turbina hidráulica.

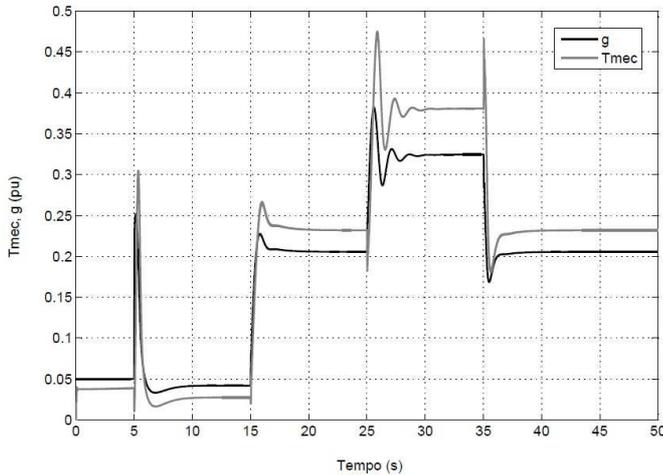


Fig. 8. Relação entre abertura do distribuidor (g) e torque mecânico da turbina (T_m).

Logo, conclui-se ser possível projetar o regulador de velocidade a partir apenas da característica dinâmica dos atuadores e considerando o restante da planta como um ganho.

Considerando a FT do sistema de controle em (18) e os parâmetros da Tabela I, pode-se projetar o regulador de velocidade com as características de um controlador PD.

Uma vez que os parâmetros da planta a ser controlada são conhecidos, e fazendo uso das ferramentas do Matlab®, é possível sintonizar os ganhos do controlador de forma a obter a resposta desejada. Desta forma, foi definido o seguinte controlador, conforme os parâmetros de projeto indicados na Tabela III.

TABELA II
Parâmetros da Planta Hidráulica

Parâmetro	Valores
A_t	1,041667 (p.u.)
H_0	1,0 (p.u.)
U_{NL}	0,020833 (p.u.)
T_w	0,655308 (p.u.)
P_{ru}	1,1 (p.u.)
P_m	5 kW
L	30 m
D	0,29 m
U_0	1,5 m/s
H_n	7 m
g_{PC}	0,98 (p.u.)
g_{SC}	0,02 (p.u.)

TABELA III
Parâmetros de Projeto do Controlador PD do Regulador de Velocidade

Parâmetro	Valor
K_p	1,5
K_D	0,9
N	0,01

Através da discretização das FT's da planta e do controlador pelo método *First Order Holder (FOH)*, obtêm-se as seguintes equações:

$$G_{freq}(z) = \frac{1,33 \cdot 10^{-6} z^2 + 5,307 \cdot 10^{-6} z + 1,323 \cdot 10^{-6}}{z^2 - 1,99z + 0,99} \quad (24)$$

$$C_{freq}(z) = \frac{91,05z - 91,04}{z - 0,99} \quad (25)$$

Por se tratar de um sistema de ação mecânica, existem limitações reais impostas pelos atuadores ao projeto dos controladores. Ações negativas não são fisicamente possíveis de serem realizadas na prática, gerando limitações na velocidade e amplitude das ações de controle.

A Figura 9 apresenta o comportamento da frequência da tensão gerada, sob diferentes condições de carga. Estes resultados foram obtidos através de simulação do regulador de frequência proposto com os ganhos indicados anteriormente. No instante de 20 s, é aplicada uma carga resistiva de 600 W aos terminais do gerador, enquanto que no instante de 30 s, esta mesma carga resistiva de 600 W é desconectada. Percebe-se por este resultado que em um tempo de aproximadamente 2 s o controle atua para regulação da frequência das tensões geradas e que a variação de frequência ocorrida no transitório de carga atende as especificações apresentadas em [24] e [25].

2) Projeto do Controle de Tensão

Uma das principais desvantagens de geradores de indução operando isoladamente é que a variação de carga nos terminais do gerador influencia consideravelmente a

amplitude da tensão gerada pela máquina de indução, mesmo que a velocidade do rotor seja mantida. A tensão nos terminais do GIAE é governada pela capacitância de excitação, pela velocidade da máquina primária e pela potência e fator de potência associado à carga aplicada, uma vez que a tensão terminal decresce com o aumento da diferença entre a potência reativa (VAR) fornecida pelos capacitores de excitação e a potência reativa requerida pelo próprio gerador e pelas cargas agregadas [12]. Logo, é possível utilizar um inversor PWM de forma a regular a tensão do GIAE durante variações de cargas.

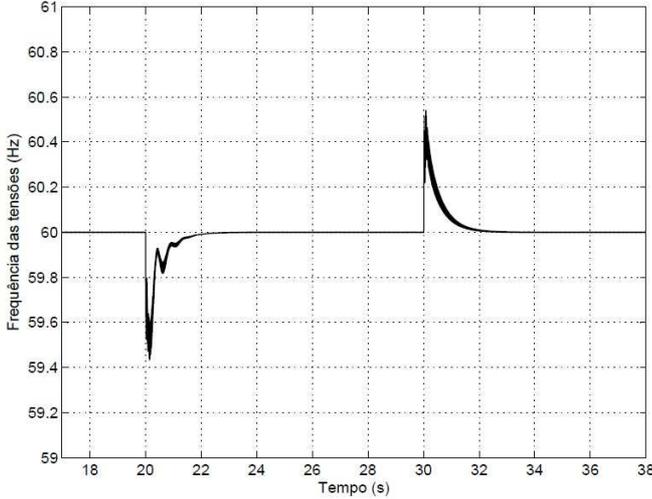


Fig. 9. Resultado de simulação - Frequência das tensões geradas durante a conexão e desconexão de uma carga resistiva de 600 W.

Como já comentado o inversor PWM opera como um compensador estático de reativos, que absorve ou injeta energia reativa no sistema de acordo com a carga para regular as tensões nos terminais do GIAE.

A Figura 10 apresenta um diagrama de blocos simplificado do sistema de controle do inversor PWM em eixos síncronos dq . O erro entre a tensão CC do barramento e seu valor de referência é a entrada de um controlador PI, que gera a corrente de referência no eixo d (i_d^*). A corrente do inversor no eixo d (i_d) controla o fluxo de energia ativa através do inversor PWM.

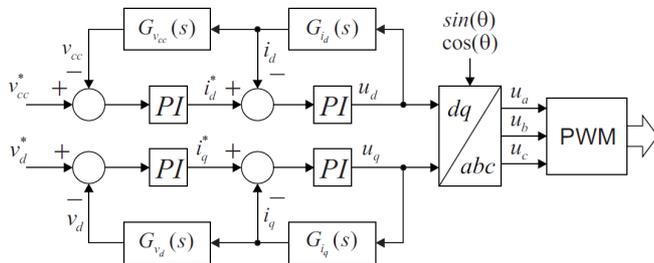


Fig. 10. Diagrama de blocos do sistema de controle do inversor PWM.

De forma similar, o erro entre a tensão de saída do gerador no eixo d e seu valor de referência é o sinal de entrada de outro controlador PI, gerando a corrente de referência no eixo q (i_q^*). A corrente do inversor no eixo q (i_q) controla o fluxo de energia reativa através do inversor PWM, afetando a

amplitude das tensões produzidas pelo sistema de geração. Os sinais de erro entre as referências de corrente (i_d^* e i_q^*) obtidas das malhas externas de tensão e as correntes medidas (i_d e i_q) são os sinais de entrada de controladores PI da malha interna de corrente, que geram as ações de controle no sistema de coordenadas dq . Essas ações de controle são transformadas novamente em grandezas em coordenadas estacionárias abc a partir de um método de sincronização proposto em [12].

A seguir serão detalhados os controladores do tipo PI apresentados na Figura 10.

3) Projeto do Controlador da Malha Externa de Tensão do Barramento CC

A fim de transformar o problema de controle da tensão do barramento CC em um simples problema de regulação de tensão, um sistema servo para a malha de tensão CC foi usado, conforme [23], a fim de regular a tensão CC em um valor desejado. Esse é baseado na equação dinâmica de balanço de potências do inversor PWM em eixos síncronos dq .

Logo a FT da planta relativa ao barramento CC é dada por:

$$G_{v_{cc}}(s) = \frac{v_{cc}}{i_d} = -\frac{2/C_{cc}}{s} \frac{v_{dn}}{v_{cn}} = \frac{-212,75}{s} \quad (26)$$

Através do Matlab®, projeta-se o controlador PI. Através da discretização das FT's da planta e do controlador pelo método FOH, obtém-se as seguintes equações respectivamente:

$$G_{v_{cc}}(z) = \frac{-0,01065z - 0,01063}{z - 1} \quad (27)$$

$$C_{v_{cc}}(z) = \frac{-2,881z + 2,479}{z - 0,99} \quad (28)$$

4) Projeto do Controlador da Malha Externa da Tensão CA do Inversor PWM

A FT que descreve o comportamento da planta da malha externa de controle da tensão CA é obtida a partir das equações de espaço de estados (20), apresentadas na seção B deste artigo.

Sabendo que o controle da amplitude da tensão CA gerada está associada ao balanço da potência reativa do sistema, a qual está diretamente relacionada ao controle da corrente no eixo q , a FT obtida da planta relaciona v_d e i_q .

Considerando os parâmetros definidos para a planta na Tabela IV, obtém-se a seguinte FT:

$$G_{v_d}(s) = \frac{v_d}{i_q} = \frac{-279,3}{s^2 + 0,1538s + 3,948.10^7} \quad (29)$$

Novamente, através do Matlab®, projeta-se o controlador PI. Através da discretização das FT's da planta e do controlador pelo método FOH, obtendo as seguintes equações, respectivamente:

$$G_{v_d}(z) = \frac{-4,564 \cdot 10^{-7} z^2 - 1,79 \cdot 10^{-6} z - 4,564 \cdot 10^{-7}}{z^2 - 1,618z + 1} \quad (30)$$

$$C_{v_d}(z) = \frac{-0,151z + 0,149}{z - 1} \quad (31)$$

$$G_{i_d-i_q}(z) = \frac{-0,4498z^2 - 0,0003595z + 0,449}{z^2 - 1,996z + 0,9976} \quad (33)$$

$$C_{i_d-i_q}(z) = \frac{0,2888z - 0,2782}{z - 1} \quad (34)$$

TABELA IV
Parâmetros da Planta

Parâmetro	Valores
Banco de capacitores	40 μ F
L_F, R_F	2,5 mH, 0,03 Ω
Capacitor barramento CC	4700 μ F/450 V
Frequência de chaveamento	10 kHz
Tensões de linha do GIAE	220 V
Velocidade	1800 rpm
Frequência	60 Hz
Corrente nominal <i>rms</i>	20 A

A resposta do controlador de tensão da malha externa de controle pode ser verificada na Figura 11, onde o controlador responde de forma adequada a degraus na referência (v_d^*).

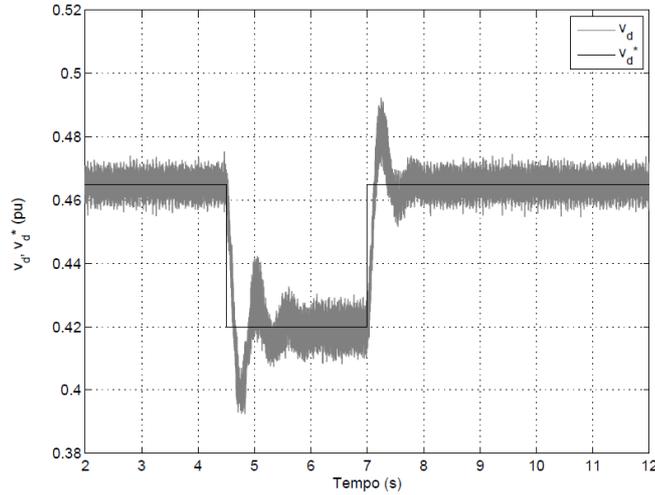


Fig. 11. Resultado de simulação - Resposta do controlador da malha externa de controle de tensão CA à degraus nos sinais de referência v_d^* .

5) Projeto dos Controladores das Malhas Internas de Corrente

O projeto dos controladores PI aplicados às malhas internas de corrente do sistema de controle do inversor PWM requer é obtida novamente fazendo uso das equações de espaço de estados (20), em conjunto com os parâmetros apresentados na Tabela IV, gerando a seguinte FT:

$$G_{i_d-i_q}(s) = \frac{i_d}{u_d} = \frac{i_q}{u_q} = \frac{-9000s - 108000}{s^2 + 24s + 1,423 \cdot 10^5} \quad (32)$$

Aplicando o método de discretização *FOH* às FT da planta e do controlador, obtêm-se as seguintes equações no domínio z , que relacionam as correntes no eixo dq (i_d e i_q) com as ações de controle também no eixo dq (u_d e u_q), respectivamente:

A equação (33) representa a função de transferência tanto para o eixo d quanto para o eixo q . A igualdade entre as FT das duas malhas se deve à simetria das matrizes de espaço de estados que definem o sistema. A equação (34) apresenta o controlador do tipo PI projetado da mesma forma para as duas malhas.

A resposta dos controladores da malha interna de controle pode ser verificada na Figura 12, onde os controladores respondem adequadamente à degraus na referência em i_d^* e i_q^* .

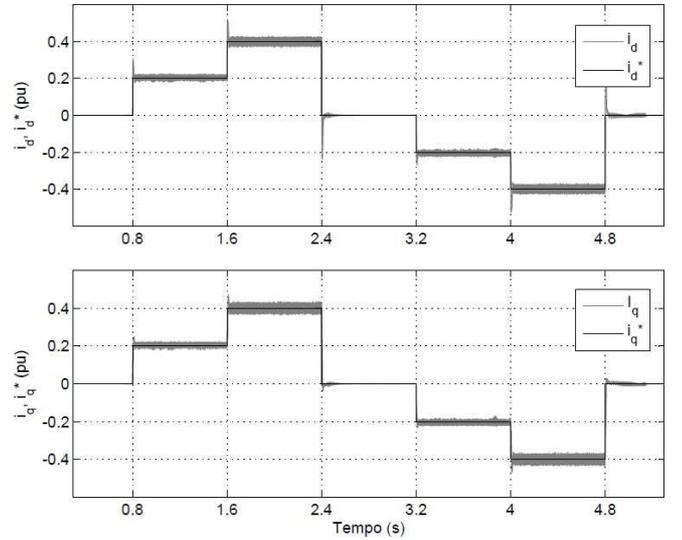


Fig. 12. Resultado de simulação - Resposta dos controladores das malhas internas de controle de tensão à degraus nos sinais de referência i_d^* e i_q^* .

A Figura 13 apresenta o comportamento da tensão gerada, durante a conexão e desconexão de uma carga de 600 W puramente resistiva aos terminais do gerador. A conexão da carga ocorre no tempo de 16 s enquanto que a desconexão ocorre no tempo de 17 s, onde se verifica a regulação das tensões do GIAE em um intervalo de tempo inferior a 0,5 segundos.

IV. SISTEMA DE GERAÇÃO IMPLEMENTADO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sistema de geração implementado é composto basicamente por um conjunto máquina primária/GIAE, inversor PWM com filtro de saída indutivo de 1ª ordem e sistema de controle formado principalmente por um processador digital de sinais DSP TMS320F28335 da Texas Instruments Inc. e dispositivos de sensoriamento de tensões e correntes, conforme parâmetros apresentados nas Tabelas I, II, III, IV e V.

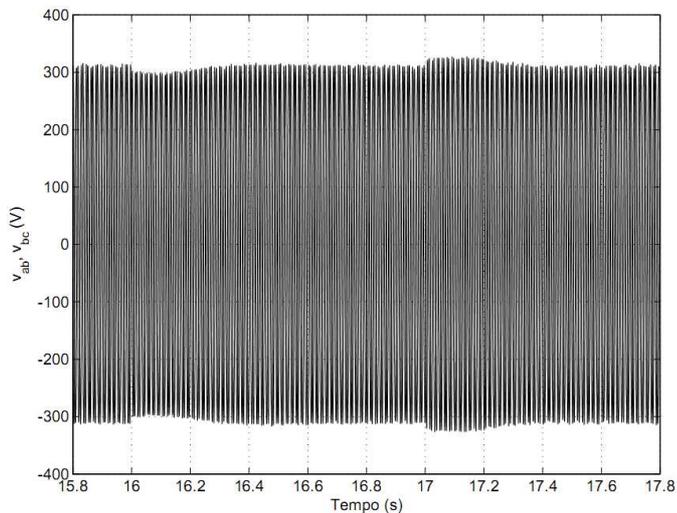


Fig. 13. Resultado de simulação - Resposta do controle de tensão à variações de carga – conexão e desconexão de carga puramente resistiva de 600 W.

TABELA V
Parâmetros do Gerador de Indução

Parâmetros	Valores
Potência do gerador	5 CV
Tensão de linha	220 V
Velocidade	1730 rpm
Resistência do estator	0,66 Ω
Resistência do rotor	0,25 Ω
Reatância de acoplamento do estator	0,929 Ω
Reatância de acoplamento do rotor	0,929 Ω
Inércia do rotor	0,034 kg.m ²
Número de pólos	4 pólos
Rendimento	87,5 %
Fator de Potência	0,81

De forma a representar o comportamento da turbina hidráulica, atuador e sistema hidráulico, foi utilizado um motor de indução 7,5 CV, acionado por inversor de frequência, como máquina primária. Com esse conjunto foi possível emular o comportamento real de uma turbina hidráulica

A escolha do modelo do DSP deve-se ao seu alto desempenho em termos de velocidade de processamento e principalmente à sua característica de operação em ponto flutuante, cujos benefícios simplificam o desenvolvimento do algoritmo de programação.

A Figura 14 mostra o procedimento de carga do barramento CC do inversor PWM. No instante que a primeira contatora é acionada, os terminais do inversor PWM são conectados ao barramento CA através de resistências para limitar a corrente de partida. Durante este período, os IGBT's estão desabilitados e o conversor PWM atua como um retificador não controlado. Ocorre ainda a pré-carga dos capacitores, elevando a tensão do barramento CC a aproximadamente 315 V. Aproximadamente em 6 s após o início da carga dos capacitores, a segunda contatora é acionada e os resistores de partida são retirados do circuito. Após mais 2 s, os IGBT's são habilitados e o controle passa a atuar sobre as chaves, fazendo com que a tensão sobre o barramento CC seja controlada em aproximadamente 450 V.

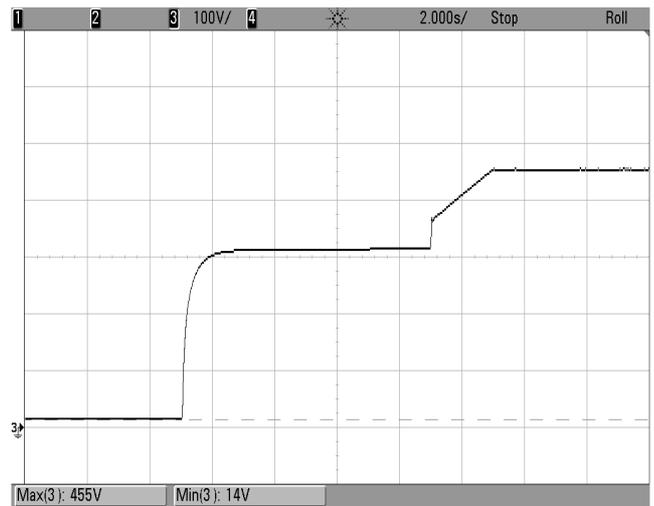


Fig. 14. Resultado experimental - Etapas de carregamento e entrada de controle do barramento CC.

A Figura 15 apresenta o comportamento transitório da frequência da tensão gerada, durante a conexão em 4 s e desconexão em 14 s de uma carga resistiva de 600 W aos terminais do gerador.

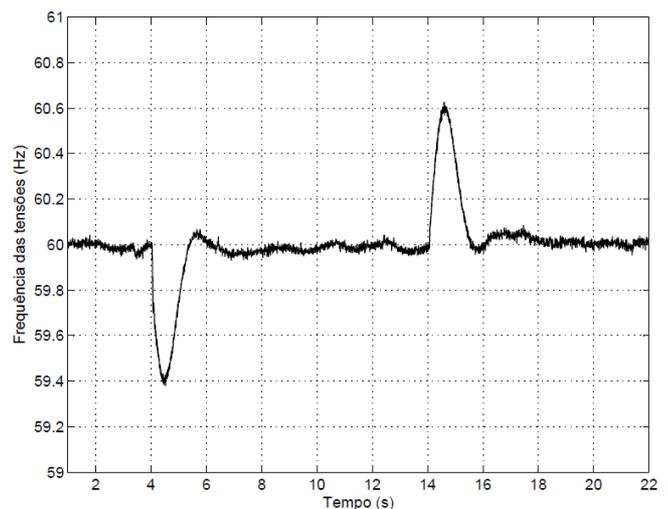


Fig. 15. Resultado experimental - Frequência das tensões geradas durante a conexão e desconexão de uma carga resistiva de 600 W.

A Figura 16 apresenta a resposta dos controladores das malhas internas de corrente a sucessivas mudanças nos valores de referência i_d^* e i_q^* e a consequente resposta das correntes em eixo dq do inversor i_d e i_q .

A Figura 17 apresenta a resposta do controlador à mudança de referência do controlador de tensão CA no eixo d de 0,46 p.u. para 0,42 p.u. e posteriormente de 0,42 p.u. para 0,46 p.u..

Por fim a Figura 18 mostra a resposta transitória do controlador de tensão a variações de carga. Neste ensaio, foi realizada a conexão, seguida posteriormente da desconexão de uma carga de 600 W resistiva aos terminais do gerador.

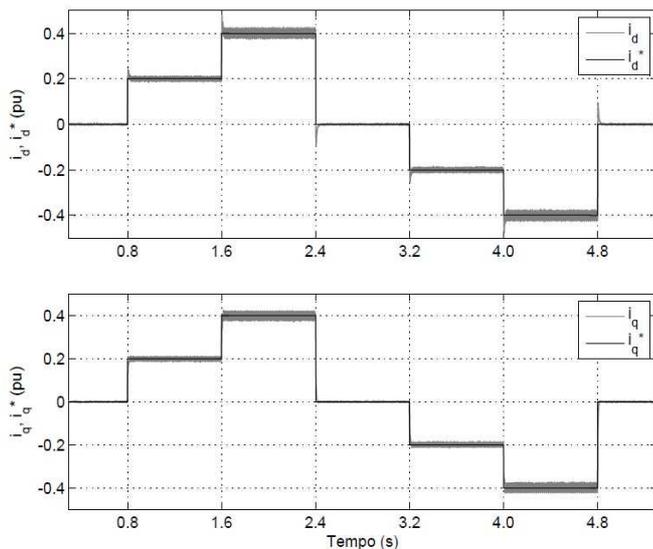


Fig. 16. Resultado experimental - Resposta dos controles de correntes a variações nos sinais de referência i_d^* e i_q^* .

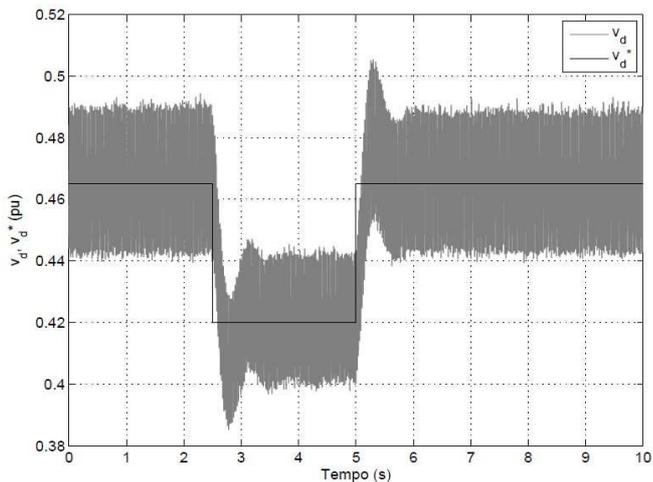


Fig. 17. Resultado experimental - Resposta do controlador da malha de tensão CA à uma variação no sinal de referência v_d^*

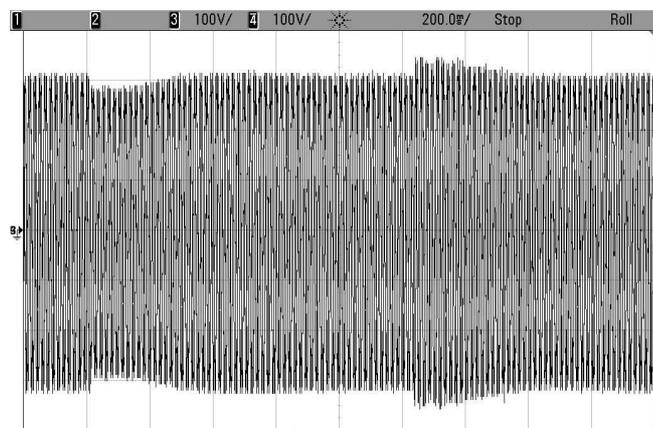


Fig. 18. Resultado experimental - Resposta do controle de tensão à variações de carga – conexão e desconexão de carga puramente resistiva de 600 W.

V. CONCLUSÕES

Este artigo propôs o uso da modelagem não linear aplicada a turbinas hidráulicas e o emprego de controladores de frequência e tensão tendo como contribuição a aplicação em uma microcentral hidrelétrica utilizando GIAE sendo que o modelo não linear comparado ao modelo linear é mais apropriado para a representação de sistemas sujeitos a grandes variações de carga e frequência.

Foi proposta uma modelagem do sistema hidráulico e elétrico, este último contemplando gerador de indução (GI), capacitores de auto-excitação e inversor PWM, sendo o GIAE considerado como uma fonte de tensão senoidal trifásica equilibrada e frequência constante. A modelagem do sistema permitiu o projeto dos controladores tanto de frequência quanto de tensão, a partir dos quais foram obtidos resultados de simulação e experimentais.

A validação dos modelos adotados é obtida a partir da comparação dos resultados de simulação e experimentais, os quais apresentaram respostas muito semelhantes. As pequenas diferenças encontradas entre os resultados estão associadas às dinâmicas não modeladas do GI e de possíveis dinâmicas associadas a amortecimentos no sistema prático que não foram considerados, principalmente no que se refere à regulação de velocidade.

Além disso, todo o sistema de controle foi implementado digitalmente através de um DSP, o que torna ágil o desenvolvimento do algoritmo de programação e também de fácil adaptação a necessidade de modificações para aplicação em outras plantas de GIAE.

Finalmente este artigo contribuiu para preencher uma lacuna na literatura referente ao emprego da modelagem não linear de turbinas hidráulicas e uso de controladores simples do tipo PD e PI aplicados a casos de microcentrais hidrelétricas, onde seja possível controlar a vazão da água e evitar que em períodos de escassez de água este sistema deixe de operar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fabio C. Posser e Tomas C. Dalla Corte pela colaboração neste trabalho. Este projeto foi financiado pelo CNPq (processo nº 471091/2010-3) e os motores foram doados pelo Grupo Voges.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic, D. Morton, "Challenges in integrating distributed Energy storage systems into future smart grid", in *Proc. of ISIE*, pp.1627–1632, 2008.
- [2] X. Energy; "Xcel Energy Smart Grid: A White Paper", *Denver Business Journal*, 2007.
- [3] Operador Nacional do Sistema Elétrica (ONS), *Sumário Executivo – Planejamento Anual da Operação Energética – Ano 2005*.
- [4] N. Martins, G. C. D. Sousa, "Controle Fuzzy do Gerador de Indução Trifásico para Micro Centrais Hidrelétricas,

- Eletrônica de Potência* – SOBRAEP, vol.12, nº 2, pp. 137-146, Julho de 2007.
- [5] Empresa de Pesquisa Energética (EPE); “Balanço Energético Nacional – Ano 2011”, disponível em <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2011.aspx> acesso em 01 de fevereiro 2012.
- [6] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Atlas de Energia Elétrica”, 2ª Edição, disponível em http://www3.aneel.gov.br/atlas/atlas_2edicao/, acesso em 10 de agosto 2011.
- [7] Eletrobrás, “Programa Luz para Todos”, Disponível em: <http://www.eletrabras.gov.br>, Acesso em 11 de setembro 2007.
- [8] Eletrobrás; Programa PROINFA, disponível em: <http://www.eletrabras.com.br/elb/portal/data/Pages/LUMISABB61D26PTBRIE.htm>, Acesso em 16 de novembro 2011.
- [9] J. C. L. V. Silva, *Modelagem, Controle e Simulação da Dinâmica Eletromecânica de uma Micro Usina Hidrelétrica na Amazônia*, Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro, 2003.
- [10] J. -M. Chapallaz, J. Dos Ghali, P. Eichenberger and G. Fischer, *Manual on Induction Motors Used as Generators*, Braunschweig: Vieweg, 1992.
- [11] R. Q. Machado, S. Buso, J. A. Pomilio, “Sistema de Geração Distribuída Utilizando Gerador de Indução Trifásico e Fontes CC Conectado a Rede Monofásica. *Eletrônica de Potência* – SOBRAEP, Campinas, vol. 10, nº 01, p. 51-58, 2005.
- [12] C. Rech, R. F. de Camargo, M. de Campos, F. Salvadori, G. V. Leandro, J. C. O. Bolacell, “Impacto de métodos de sincronismo no desempenho de geradores de indução auto-excitados”, *Controle & Automação - SBA*, vol.19, nº 04, pp. 475-485, Out./Dez. 2008.
- [13] M. G. Simões, F. A. Farret, *Alternative Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators*, CRC Press, 2ª Ed., 2007.
- [14] W.L. Chen, and Y.Y. Hsu, “Experimental Evaluation of an Isolated Induction Generator with Voltage and Frequency Control,” in *Proc. of SPEEDAM*, pp. 497-502, 2006.
- [15] E. G. Marra, and J. A. Pomilio, “Induction-Generator-Based System Providing Regulated Voltage with Constant Frequency,” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 04, pp. 908-914, Aug. 2000.
- [16] B. Singh, S. S. Murthy, and S. Gupta, “Analysis and Design of Electronic Load Controller for Self-Excited Induction Generators,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 285-293, Mar. 2006.
- [17] R. Bonert and S. Rajakaruna, “Self-excited induction generator with excellent voltage and frequency control,” *IEE Proc. Generation Transmission and Distribution*, vol. 145, no.1, pp. 33- 39, 1998.
- [18] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGrawHill, New York, 1994.
- [19] Working Group On Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, “Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 01, pp. 167-179, Feb. 1992.
- [20] J. Björnstedt, O. Samuelsson, Voltage and Frequency Control for Island Operated Induction Generators, in *Proc. of IET-CIRED Seminar on SmartGrids for Distribution*, paper 98, p. 1-4, 2008.
- [21] S. R. dos Santos, *Proposta para Implantação de Microcentrais Hidrelétricas Automatizadas com o Emprego de Geradores Assíncronos*. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2003.
- [22] L. G. Scherer, *Modelagem e controle de uma micro central hidrelétrica com utilização de gerador de indução auto-excitado*, Dissertação de Mestrado, UFSM, Santa Maria, 2012.
- [23] R. F. Camargo, H. Pinheiro, “Filtro Ativo de Potência para Compensação de Harmônicos de Tensão em Sistemas de Distribuição Trifásicos a Quatro Fios”, *Eletrônica de Potência- SOBRAEP* , vol.12, pp. 63 - 70, Março 2007.
- [24] IEC 60034, *Rotating Electrical Machines Part 3: Specific Requirements for Turbine-Type Synchronous Machines*, 1996.
- [25] IEEE Std C37.106-2003, *IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*, 2003.

DADOS BIOGRÁFICOS

Lucas Giuliani Scherer, Possui graduação (2007) e mestrado (2012) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. Atuou profissionalmente entre os anos 2006 e 2009 na área WEG Máquinas, desenvolvendo atividades relacionadas ao projeto, instalação e manutenção de máquinas de grande porte. Atualmente, é professor do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM). Entre suas áreas de interesse destacam-se: controle de máquinas, eletrônica de potência, gerador de indução auto-excitado, regulação de tensão e frequência. É membro da SOBRAEP.

Robinson Figueiredo de Camargo, Possui graduação (2000), mestrado (2002) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) com ênfase em Processamento de Energia Elétrica. Foi professor e coordenador do Curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI e professor do mestrado em Modelagem Matemática. Atualmente, é professor e Coordenador do Curso de Engenharia de Controle e Automação da UFSM. É também professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM. Entre suas áreas de interesse destacam-se: filtros ativos de potência, pequenas centrais hidrelétricas, retificadores PWM trifásicos, métodos de sincronização de conversores e modulação Space Vector. É membro da SOBRAEP e da SBA.