



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO-IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE USINAS HIDROELÉTRICAS EQUIPADAS COM GERADORES A VELOCIDADE VARIÁVEL

**A. C. Padoan Jr.
Alstom Hydro Energia Brasil Ltda.**

RESUMO

Este artigo apresenta modelo completo e estudo do comportamento dinâmico de uma usina hidroelétrica de 343MVA funcionando com geradores assíncronos com rotor bobinado e arquitetura a velocidade variável. São apresentadas simulações comparando as respostas da arquitetura à velocidade variável com a de uma máquina síncrona convencional equivalente. Mudanças nos *setpoint* de controle da potência ativa e perturbações de tensão na rede são aplicadas. Os resultados comprovam o melhor comportamento dinâmico do gerador a velocidade variável. Suas respostas são rápidas e livres de oscilações indesejáveis de potência. O trabalho presente ajuda a esclarecer os benefícios da arquitetura a velocidade variável.

PALAVRAS-CHAVE Hidroeletricidade, Velocidade Variável, Modelagem, Resposta Dinâmica.

1.0 - INTRODUÇÃO

Máquinas a velocidade variável têm um futuro promissor no mercado mundial de energia hidráulica. Elas podem proporcionar aumento em até 3% no rendimento global da instalação e ainda melhorar o comportamento dinâmico do sistema devido ao controle de potência ativa e reativa dissociados. Sua utilização em modo reverso, isto é, em modo bomba, as tornam estratégicas onde há forte penetração de fontes de energia renovável intermitentes, como eólica ou solar.

A usina hidroelétrica considerada neste artigo contém duas bombas-turbinas do tipo Francis. Os geradores síncronos originais possuem potência de 343 MVA e estão ligados a uma rede elétrica que pode ser considerada infinita. Quando conveniente, as máquinas síncronas são utilizadas como motor ou gerador. Como motor, isto é, em modo bomba, a água do nível jusante é transportada reservatório acima armazenando a energia excedente produzida pelo sistema elétrico. Ainda que existam perdas significativas no processo de bombeamento, a viabilidade econômica do sistema é garantida pelos preços mais baixos da energia produzida em horário de pouco consumo, geralmente advindas de fontes intermitentes de energia como parques eólicos ou painéis fotovoltaicos.

A utilização de bombas-turbinas, em contrapartida, geralmente compromete a eficiência hidráulica em comparação a uma turbina Francis comum. Isto por que as adaptações necessárias para que a turbina funcione adequadamente também como bomba, diminuem o rendimento no ponto nominal de operação em ambos os modos de operação. Esta baixa de rendimento pode ser compensada em arquiteturas a velocidade variável. Geradores a velocidade variável têm a velocidade de rotação mecânica independente da frequência elétrica do sistema. Sendo assim, em carga parcial, uma mudança de velocidade pode melhorar o rendimento da turbina. Desta maneira, espera-se um aumento global do rendimento do sistema em torno de 3% com a arquitetura a velocidade variável. Em modo bomba, a velocidade variável tem o benefício extra do controle da potência, o que melhora os transientes vistos pelo sistema elétrico.

Além do rendimento maior, a arquitetura a velocidade variável, doravante chamada de *VarSpeed*, tem o desempenho dinâmico melhorado. Um dos focos do artigo é mostrar algumas diferenças de desempenho dinâmico entre o sistema convencional, usando máquinas síncronas e o *VarSpeed*.

Este trabalho propõe uma adaptação na usina hidrelétrica de modo que ela funcione com velocidade variável. No lugar dos geradores síncronos, são usados geradores assíncronos com rotor bobinado equivalentes, ou DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*). As hidroelétricas com os geradores síncronos e a com a arquitetura *VarSpeed* são modeladas e simuladas com ajuda do software Simsen¹. Na Seção 2, a modelagem de ambos os sistemas é apresentada. Como os fenômenos hidráulicos são de extrema importância para o grau de realismo das simulações, o artigo apresenta de forma sucinta a modelagem hidro-acústica usada pelo software Simsen para o estudo de transientes hidráulicos. A vantagem deste software é poder integrar tanto a modelagem elétrica, isto é, geradores, linhas de transmissão, sistemas de controle, conversores de frequência, etc, com elementos hidráulicos, tais como, turbinas, condutos, válvulas, chaminés de equilíbrio, etc. A performance dinâmica de ambos os sistemas é comprada através de simulações, na Seção 3. Mudanças de referência de potência e queda de tensão são aplicadas.

2.0 - MODELAGEM

2.1 Modelagem hidráulica

Os componentes hidráulicos e elétricos da central foram modelados com auxílio do programa de simulação Simsen. O programa trabalha resolvendo um conjunto de equações global do sistema através das leis de Kirchhoff, como descrito na Equação [1]. O vetor de estados é representado pelo vetor \vec{x} , $[A]$ e $[B]$ são as matrizes do sistema global e \vec{C} é o vetor das condições limites do sistema.

$$[A] \cdot \frac{d\vec{x}}{dt} + [B] \cdot \vec{x} = \vec{C} \quad [1]$$

A Equação é calculada no domínio do tempo utilizando um algoritmo do tipo Runge-Kutta de ordem 4. Simsen usa um modelo hidro-acústico (1) para calcular a evolução do fluxo da água e da pressão em todos os pontos do circuito hidráulico.

Para isto, os componentes hidráulicos são modelados através de um circuito elétrico equivalente, onde a pressão é análoga à tensão e o fluxo é análogo a corrente. Isso é possível graças às certas simplificações das equações de conservação de massa e momento que descrevem o movimento da água (2). Estas equações podem ser simplificadas até uma forma equivalente às equações de linha de transmissão elétrica. Para um elemento de conduto hidráulico convencional, por exemplo, assume-se que a pressão e a velocidade no seu interior têm distribuição uniforme na seção transversal do tubo. É possível negligenciar também os termos convectivos de tais equações. O resultado final, unidimensional, das equações de conservação de momento e continuidade para um elemento da tubulação de comprimento dx , com a seção transversal A , e com uma velocidade de propagação de onda acústica a , é resumido pelas seguintes equações diferenciais parciais hiperbólicas (2):

$$0 = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \quad 0 = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{gA} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\lambda|Q|}{2gDA^2} \cdot Q \quad [2]$$

onde h é a altura piezométrica em $[m]$, e Q é o fluxo em $[m^3 / s]$, g é a gravidade em $[m / s^2]$.

A velocidade de propagação da onda acústica é dada por:

$$a^2 = \frac{1}{\rho \left(\frac{1}{E_{\text{água}}} + \frac{D}{eE_c} \right)} \quad [3]$$

onde $E_{\text{água}}$ é o módulo de Bulk da água, E_c é o módulo de Young da tubulação, e sua espessura e D o diâmetro.

¹ Programa de Simulação desenvolvido pelo *Swiss federal Institute of Technology* em Lausanne para análise de sistemas de potência (<http://simsen.epfl.ch/> ou <http://www.powervision-eng.ch/>).

Equações acima são as de um sistema de equações diferenciais ordinárias que podem ser representadas de forma equivalente a um circuito em forma de T , tal como uma linha de transmissão. Veja a Figura 1. Os parâmetros RLC deste circuito equivalente são dados por:

$$R = \frac{\lambda |\bar{Q}| dx}{2gDA^2}, \quad L = \frac{dx}{gA}, \quad C = \frac{gAdx}{a^2} \quad [4]$$

onde λ é o coeficiente de perda local. A resistência hidráulica R , a indutância hidráulica L , e a capacitância hidráulica C correspondem respectivamente às perdas de energia, inércia e efeitos de compressão. O modelo de um conduto de comprimento L é feito através de uma série de n_b elementos baseados no esquema equivalente representado na Figura 1. O sistema de equações deste modelo é usado no software Simsen através das leis de Kirchoff de maneira a incluí-los na Equação 1.

A bomba-turbina é modelada utilizando funções que representam velocidade, vazão para diferentes aberturas do distribuidor (1). Com estas curvas é possível representar a turbina como uma fonte de pressão em série com um termo inercial $L_t = \int_I^{\bar{I}} \frac{dx}{g \cdot A(x)}$ do fluxo da entrada da turbina I até a saída \bar{I} conforme a Figura 2. Ainda existe

o termo R_t representando as perdas de carga. Maiores detalhes sobre esta modelagem e de outros componentes hidráulicos podem ser encontrados em (1) ou (3).

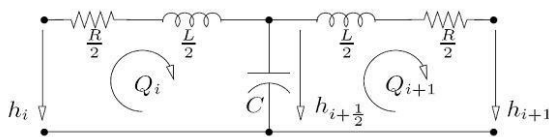


Figura 1: Elemento do circuito hidráulico.

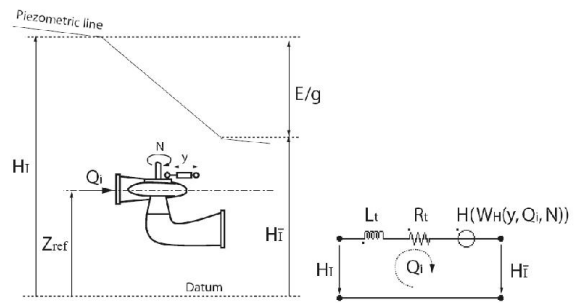


Figura 2: Circuito equivalente da turbina.

2.2 Modelo do circuito hidráulico

A Hidroelétrica tem circuito hidráulico representado pela Figura 3.

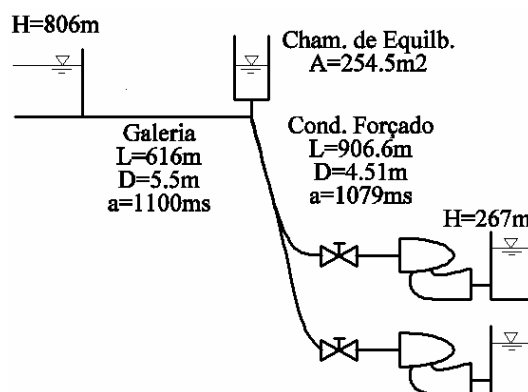


Figura 3 - Modelo Hidráulico do Sistema.

Pode-se notar a existência de um reservatório, uma chaminé de equilíbrio e um conduto forçado ligado a duas bombas-turbinas Francis. Os parâmetros principais da turbina são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros principais do sistema.

Bomba-turbina Francis		Sistema de excitação	
Velocidade rotacional nominal	$N_n=450$ RPM	Ganho principal	$K_e=150$
Altura nominal	$H_n=552$ m	Ganho do bloco derivativo	$K_f=0.007$
Fluxo nominal	$Q_n=64.15$ m ³ /s	Const. de tempo do bloco derivativo	$T_f=0.06$ a
Diâmetro de referência	$D_{ref}=4.41$ m	Constante de tempo das medições	$T_{ut}=0.1$ s
Inércia total da turbina	$J=139098$ Kg.m ²	Limites de saída	$-4.9 < U_{fd} < 4.6$ pu
Máquina síncrona		Máquina DFIG	
Potência nominal	$S_n=343$ MVA	Potência nominal	$S_n=334$ MVA
Tensão nominal	$U_{ns}=18$ KV	Tensão nominal	$U_{ns}=18$ KV
Frequência	$F_n=60$ Hz	Frequência	$F_n=60$ Hz
Par de pólos	$P_p=8$	Relação de espiras estator/rotor	$u=0.592$
Inércia total do Rotor	$J=1721402$ kg.m ²	Par de pólos	$P_p=8$
Rigidez torsional do eixo	$K=2.03 \cdot 10^9$ N.m/rad	Inércia total do Rotor	$J=1081140$ kg.m ²

2.3 Modelo da máquina síncrona

O modelo original do gerador é uma máquina síncrona. O software Simsen possibilita modelar o gerador através de circuitos elétricos equivalentes tanto para o eixo direto como em quadratura. São necessários, portanto, os valores das resistências internas, reatância síncrona, reatância de fugas, etc. Porém, apenas os parâmetros principais do gerador estão expostos na Tabela 1.

O gerador é conectado a uma rede infinita através de uma rede de linha de transmissão de 345kV, conforme apresentado na Figura 4. A hidroelétrica é na realidade conectada ao sistema elétrico maior, através de duas linhas de transmissão. O primeiro segmento de linha de transmissão tem os seguintes parâmetros: $L = 14.6$ mH e $R = 0,55 \Omega$. Os outros dois segmentos paralelos têm respectivamente: $L = 14.6$ mH, $R = 0,55 \Omega$ e $L = 78$ mH, $R = 3 \Omega$. O modelo do sistema de excitação estática é representado pelo bloco V_{reg} na Figura 4. A Tabela 1 apresenta também os principais parâmetros do sistema de excitação. O modelo do controlador da turbina, que ajusta a abertura das palhetas diretrizes y , é dado pela Figura 5. Ele foi configurado para controlar a potência ativa e utiliza os seguintes parâmetros: $K_1 = 0.3$; $K_2 = 1$; $K_\omega = 0.6$; $T_1 = T_2 = 0$; $T_3 = 0.1$; $\tau_{sv} = 0.01$; $\tau_\omega = 0.01$.

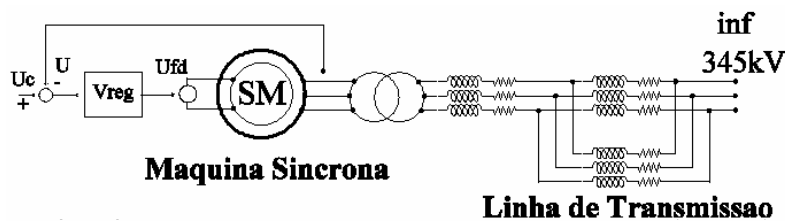


Figura 4: Esquema do gerador síncrono.

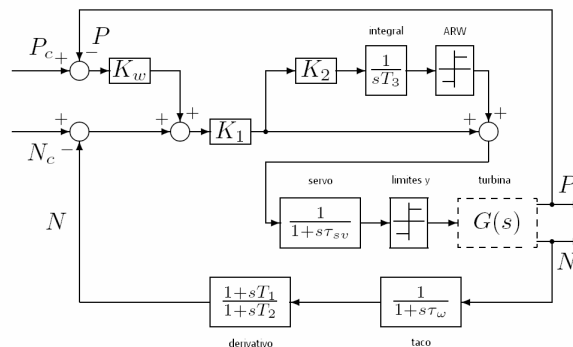


Figura 5: Controlador da turbina

2.4 Modelo com velocidade variável

A arquitetura utilizada inclui um gerador indutivo com rotor bobinado, ou DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*), conectado a um conversor de frequência back-to-back AC-DC-AC com 2 níveis de tensão (4) (5). O conversor é modelado através de tiristores discretos, o que aumenta o grau de realismo das simulações (6). Existe ainda um capacitor usado como link DC entre o conversor AC-DC do lado do estator com o conversor DC-AC do lado do rotor. O esquema geral da arquitetura DFIG é apresentado pela Figura 6.

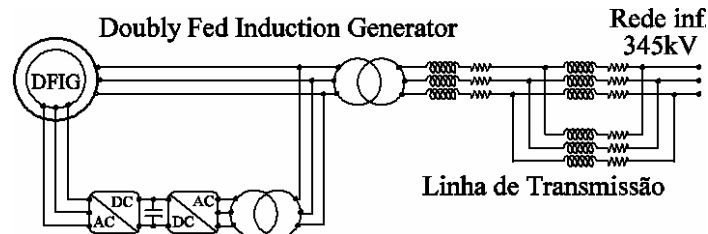


Figura 6: Esquema da arquitetura a velocidade variável.

O DFIG da Figura 6 tem seus principais parâmetros apresentados na Tabela 1. Uma das vantagens desta arquitetura é a possibilidade de controle da potência ativa e reativa com respostas rápidas e de forma dissociada, ou seja, sem interferência do controle de potência ativa no controle da potência reativa, e vice-versa. Isto é possível graças a utilização de controladores PIDs bi-dimensionais aplicado as transformadas de Park de variáveis de corrente e tensão (6). A Figura 7 resume o esquema geral de controle. O lado do conversor ligado ao rotor pode ser configurado para controlar a corrente AC do rotor, que por sua vez, controla a potência ativa e reativa gerada no estator (Figura 7-(b)). O lado do conversor conectado ao estator, que na realidade está ligado a um transformador, controla a potência reativa que passa através do transformador e a tensão DC do capacitor, que deve ser mantida constante (Figura 7-(c)). Neste caso, o controlador da turbina é encarregado da regulação de velocidade (Figura 7-(a)), controlando o torque mecânico no eixo através da abertura do distribuidor γ . Maiores detalhes sobre este controle podem ser encontrados em (6).

A referência (*set-point*) de velocidade ideal é calculada a partir de uma função que usa a potência ativa de referência e a pressão na turbina, maximizando o rendimento da turbina (5). Porém, existem limites de variação de velocidade, típicos da ordem de $\pm 7\%$ da velocidade nominal, devido às potências que circulam no conversor de frequência.

O controle de reativos é feito pelo conversor ligado ao rotor que é comandado para regular a tensão da máquina através de um outro controlador proporcional, ligado em cascata. O *set-point* de reativos consumidos pelo conversor de frequência através do transformador é, neste caso, constante e igual à zero.

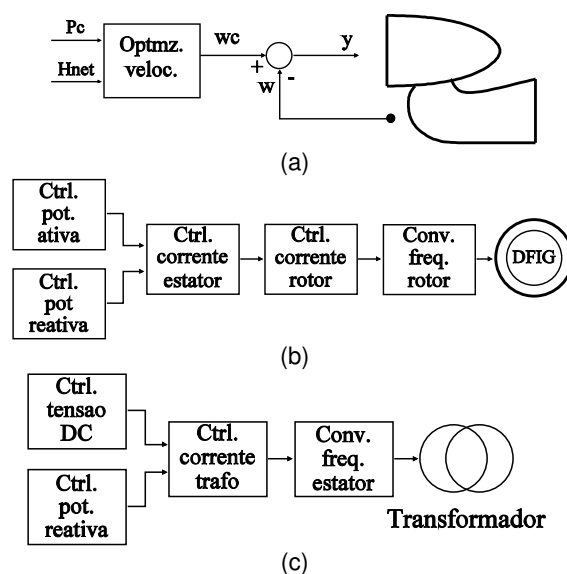


Figura 7: Esquema de controle da velocidade variável.

3.0 - SIMULAÇÃO

As duas simulações propostas demonstram os benefícios dinâmicos da velocidade variável. Todas as simulações começam com o sistema fornecendo 90% da potência nominal, ou seja, as referências de potência ativa e de tensão estão configuradas para 0.9 p.u. e 1.0 p.u. respectivamente. No caso do *VarSpeed*, a referência de velocidade nas simulações é sempre deixada constante e igual a 1.0 p.u.

A primeira simulação utiliza uma mudança brusca na referência de potência. Conforme a linha vermelha da Figura 8, primeiramente, a referência desce de 0.9 p.u para 0.75 p.u em dez segundos e outra vez ela sobe para 0.9 p.u. A Figura 8 mostra os resultados comparando os modelos *VarSpeed* e com gerador síncrono. Na figura estão os gráficos da potência ativa, a reativa, a tensão nos bornes do estator e a velocidade de rotação.

É possível observar que o *VarSpeed* reage a mudança de referência de potência de forma bem rápida (ela praticamente segue a curva de referência), enquanto a resposta da máquina síncrona tem um atraso típico. Ainda, é possível notar alguns efeitos hidráulicos considerados pelo modelo hidro-acústico. Por exemplo, o repentino aumento de potência gerada pela máquina síncrona logo após a referência começar a se mover em direção aos 0.75 p.u. (logo após o 0 segundo). Este é um efeito hidráulico causado pela inércia da água logo que os palhetas diretrizes começam a se movimentar fechando o distribuidor, causando um aumento de potência hidráulica contraditório ao fechamento do distribuidor. A figura da tensão mostra que ambos os modelos estão próximos de 1.0 p.u. A diferença é pequena e deve-se aos sistemas de controle de tensão diferentes em cada caso. Isto explica, portanto, a diferença de reativos fornecidos por ambos os modelos.

O ponto interessante desta simulação é mostrado pelas curvas de velocidade. Lembrando que o controle de velocidade do *VarSpeed*, que é feito através da turbina, tem uma resposta lenta (pois as constantes de tempo mecânicas e hidráulicas são naturalmente mais lentas em relação às constantes de tempo elétricas do gerador), pode-se observar que a velocidade de rotação oscila ao redor da referência 1 p.u, chegando a ultrapassar 3% da velocidade nominal. Logicamente, para o *VarSpeed*, esta mudança de velocidade não é um problema, pois os conversores de frequência então fornecendo tensão AC para o rotor de forma a manter o fluxo magnético rotativo na frequência nominal do sistema elétrico. As massas inerciais do rotor e da turbina estão neste caso, ora absorvendo energia do sistema elétrico (de forma a acelerar sua velocidade) ora devolvendo energia ao sistema elétrico (desacelerando a velocidade). A possibilidade de usar a energia acumulada nas massas inerciais tem grande responsabilidade na alta performance do controle de potência do *VarSpeed*, compensando a reação lenta do controlador da turbina ao ajustar indiretamente a potência gerada.

A segunda simulação mostra a reação dos dois modelos após uma queda de tensão de 10% do sistema elétrico. Os resultados estão na Figura 9. A potência ativa no caso do *VarSpeed* pouco muda. No caso da máquina síncrona, oscilações de 0.5Hz aparecem. Este é o modo de oscilação local (7) desta máquina, que normalmente pode ser atenuado com auxílio de um PSS (*Power System Stabilizer*). O *VarSpeed* funciona como se já tivesse um PSS ideal, pois os controles de reativos muito pouco interferem nos ativos. Podemos ver aqui também que o controle de tensão do *VarSpeed* é mais rápido que o da máquina síncrona.

4.0 - CONCLUSÕES

Hidroelétricas a velocidade variável já são uma realidade no mercado mundial. Os aspectos ambientais da produção de energia as colocam em evidência graças a sua capacidade de gerir com estabilidade sobras de energia advindas de outras fontes renováveis, principalmente as eólicas. Esse artigo tem a função de apresentar e salientar alguns de seus aspectos positivos. Para isto, uma hidroelétrica real com sistema de acumulação que usa máquinas síncronas é criteriosamente modelado. Um modelo equivalente usando arquitetura à velocidade variável foi projetado a título de comparação, conservando a mesma turbina Francis e o mesmo circuito hidráulico. A integração do modelo hidro-acústico dos elementos hidráulicos junto com os elementos elétricos possibilita uma modelagem realista. Em suma, possibilita a interação de todos os fenômenos físicos hidráulicos em jogo em uma central hidroelétrica com os fenômenos elétricos, incluindo o golpe de aríete, oscilações de pressão entre o reservatório e a chaminé de equilíbrio, modos de oscilação da turbina, alguns efeitos de cavitação, etc. Além disto, este trabalho atenta aos modelos das partes elétricas como os conversores de frequência, modelados com tiristores individuais e com todo o controle de acionamento de forma realista. O artigo mostra de forma bem sucinta a modelagem dos elementos utilizados e a arquitetura de controle empregada, porém a referência bibliográfica discorre sobre os conceitos apresentados com profundidade.

Tendo em vista a comparação de desempenho entre o *VarSpeed* e a máquina síncrona, os resultados das simulações comprovam que a velocidade variável tem grandes vantagens no desempenho dinâmico. Além de melhorar o rendimento global da turbina, ela propicia um rápido ajuste da potência ativa e reativa. Ela facilmente pode adquirir um papel forte na estabilidade do sistema elétrico da qual está inserida. O fato dela não gerar oscilações de potência na faixa de 0.2 a 2 Hz (modo local de oscilação) após perturbações da rede também reforça seu caráter estabilizante.

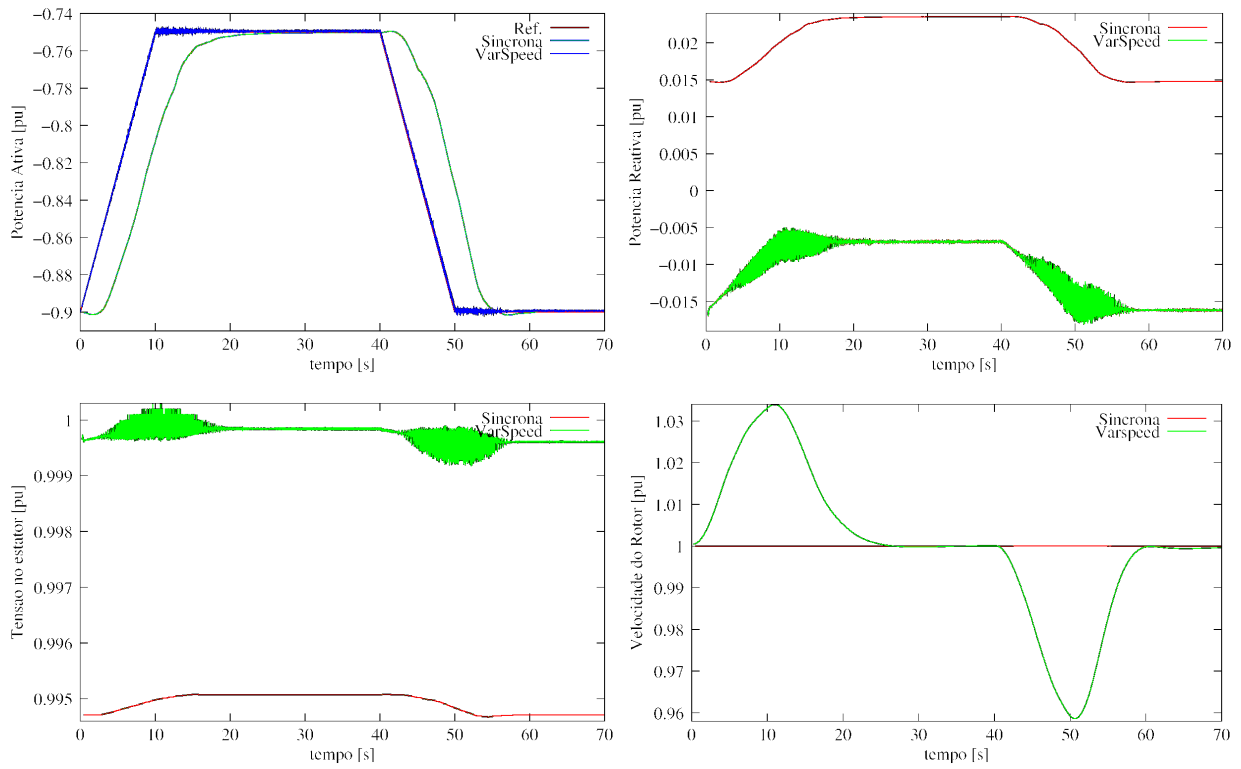


Figura 8: Mudança na referência de potência.

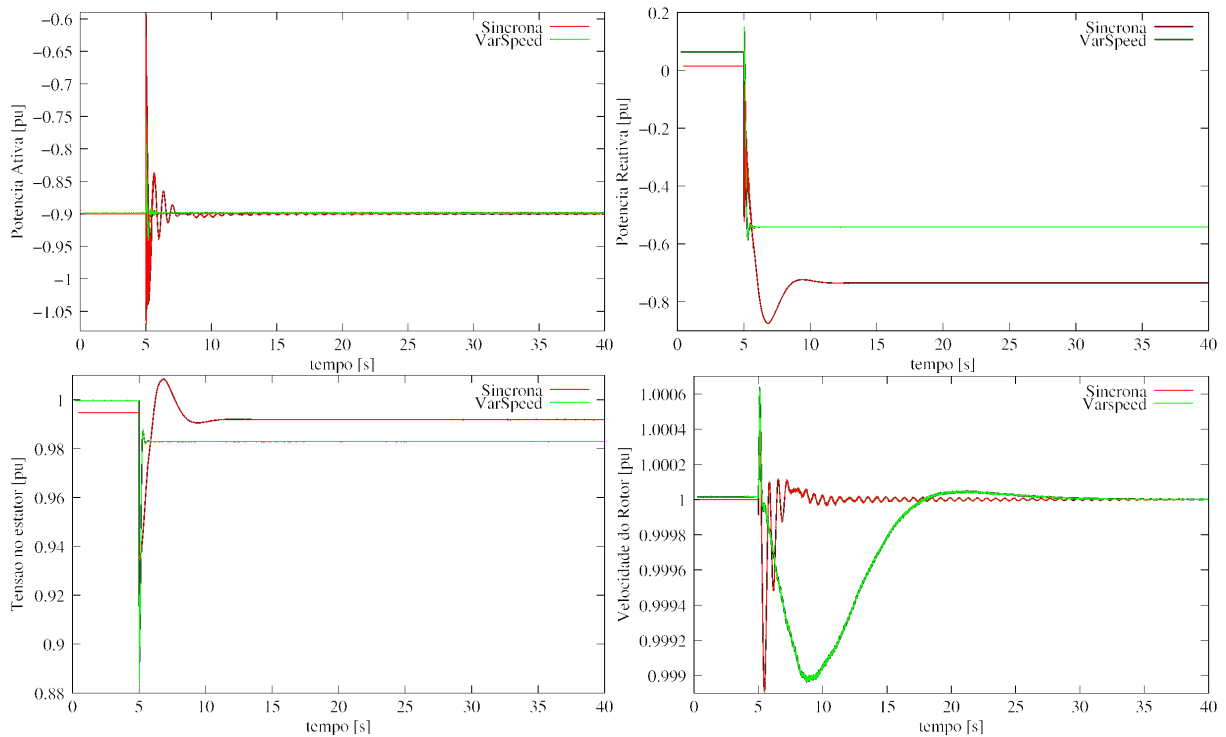


Figura 9: Queda de tensão.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NICOLET, C., Hydroacoustic modelling and numerical simulation of unsteady operation of hydroelectric systems," dissertação Ph.D, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2007.
- (2) WYLIE, E. B. , STREETER, V. L., Fluid transients in systems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993, vol. 1.
- (3) NICOLET, C., GREIVELDINGER, B., H'EROU, J., KAWKABANI, B., ALLENBACH, P., SIMOND, J., AVELLAN, F., High-order modeling of hydraulic power plant in islanded power network, Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 22, no. 4, pp. 1870–1880, Novembro 2007.
- (4) SCHWERY, A., FASS, E., HENRY, J.-M., BACH, W., MIRZAIAN, A., Pump storage power plants, alstom's long experience and technological innovation, Hydro 2005, Villach, Austria, 2005.
- (5) PANNATIER, Y., NICOLET, C., KAWKABANI, B., DENIAU, J-L., SHWERY, A., AVELLAN, F., SIMOND, J-J., Transient behavior of variable speed pump-turbine units, 24th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Foz do Iguaçu, Outubro de 2008.
- (6) HODDER, A., Doble-fed asynchronous motor-generator equipped with a 3-level vsi cascade, Dissertação Ph.D, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2004.
- (7) LARSEN, E., SWANN, D., Applying power system stabilizers, parts i, ii, and iii, Power Apparatus and Systems, IEEE trans., vol. 100, no. 6, pp. 3017–3046, Junho 1981.

6.0 - AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer as seguintes pessoas que também se envolveram para que este trabalho fosse possível: Alexander Schwery e Carlos Ramirez, ambos do departamento de pesquisa de desenvolvimento de geradores da ALSTOM-Suíça (ALSTOM (Switzerland) Ltd., Hydro Generator Technology Center, CH-5242 Birr, Switzerland); Christophe Nicolet, principal consultor da PowerVision engenharia (<http://www.powervision-eng.ch/>); Prof. Basile Kawkabani e Prof. J-J Simond; ambos do Laboratório de Máquinas Elétricas da Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (<http://lme.epfl.ch/>); e finalmente, Prof. François Avellan, do Laboratório de Máquinas Hidráulicas da Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (<http://lmh.epfl.ch/>).

7.0 - BIOGRAFIA

Antonio C. Padoan Jr., natural de Taubaté, nascido em 1979, graduado como Engenheiro Eletricista pela Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP. Recebeu o título de Mestre da mesma escola em 2005, participando do Laboratório de Sistemas Inteligentes (LASI). Ele se integrou a Alstom Hydro Energia Brasil Ltda. em 2005. Também obteve mestrado em Engenharia Mecânica, em 2008, pelo Laboratório de Máquinas Hidráulicas do *Swiss Federal Institute of Technology*, EPFL em Lausanne, Suíça.

No primeiro semestre de 2008, trabalhou com modelagem de máquinas a velocidade variável pela Alstom Power (Suíça) Ltd. Hoje trabalha com sistemas na Alstom Hydro Energia Brasil Ltda. Seus interesses são controle, automação, processamento de sinais e sistemas de energia, principalmente os relativos à geração de energia hidroelétrica e eólica.