



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

FI/GAT/31  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

## **GRUPO - IV**

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

#### **IMPORTÂNCIA DA VALIDAÇÃO DE MODELOS ATRAVÉS DE ENSAIOS EM CAMPO PARA ESTUDOS DE REGULAÇÃO PRIMÁRIA E REPOTENCIALIZAÇÃO EM USINAS HIDRELÉTRICAS**

Rafael Bertolini de Paiva (\*)  
**REIVAX**

Cristiano Bühler  
**REIVAX**

Paulo Marcos P. Paiva  
**REIVAX**

João Marcos Soares  
**REIVAX**

Lucas Manso da Silva  
**REIVAX**

## **RESUMO**

A representação clássica linear e sem perdas do conjunto turbina-condução hidráulica foi vastamente utilizada no passado em estudos de estabilidade de sistemas de regulação de velocidade. Esse modelo é apropriado para pequenas perturbações, representando as características de uma turbina prática somente em baixas frequências.

Para respostas satisfatórias e operação estável em estudos de regulação primária, esse modelo clássico poderá não ser adequado, e um modelo mais detalhado englobando características não lineares do conduto-turbina será necessário.

Nesse Informe Técnico serão apresentados comparativos entre a modelagem linear e a não linear, considerando curvas de campo e simulações.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Regulador de Velocidade, Turbinas Hidráulicas, Conduto-Forçado, Regulação Primária, Modelagem de Sistemas de Potência.

## **1.0 - INTRODUÇÃO**

No passado, o modelo clássico ideal sem perdas da turbina-condução hidráulica foi utilizado vastamente para avaliar a estabilidade e obter os parâmetros ótimos dos reguladores de velocidade. Essa representação simples da turbina hidráulica tem facilitado os requisitos computacionais necessários na verificação das respostas transitórias quando sujeito a distúrbios como um degrau de carga. No entanto, a utilização desse modelo simples e linearizado do conduto-turbina nos estudos tem negligenciado os efeitos da compressibilidade da água e elasticidade da tubulação, levando a uma menor precisão dos resultados.

A representação detalhada do sistema hidráulico irá assegurar maior precisão na análise da estabilidade de reguladores de velocidade. Em sistemas de potência, a estabilidade é um requisito vital na operação, portanto uma resposta rápida do regulador de velocidade para retornar a frequência do sistema ao patamar nominal quando sujeito a distúrbios é desejado. Isso requer, no entanto, uma representação mais detalhada do modelo da turbina-conduto hidráulico onde características não lineares devem ser levadas em conta no modelo, tais como: aceleração da coluna d'água, fricção, nível ou altura de queda, curva abertura x potência, etc. Isso para interpretar o comportamento dinâmico do sistema com maior precisão e aproximá-lo à realidade, numa ampla faixa de frequência (1), bem como para grandes perturbações.

(\*) Rod. José Carlos Daux, 600 – Tecnópolis - CEP 88030-904 Florianópolis, SC – Brasil  
Tel: (+55 48) 3027-3751 – Fax: (+55 48) 3027-3735 – Email: [rbp@reivax.com.br](mailto:rbp@reivax.com.br)

Todavia, a simples representação através de modelos mais complexos não é suficiente. Há uma etapa importante do processo de modelagem que é a validação dos modelos, etapa essa possível somente através de ensaios em campo. Problemas como os relatados por Kosterev (2), onde as simulações de grandes distúrbios não são reproduzidas de forma satisfatória com as obtidas na prática, são indicativos de modelos inadequados, e da falta da validação destes.

Neste Informe Técnico será abordada a modelagem de uma turbina do tipo Francis, com conduto simples, representada por modelos lineares e não lineares.

## 2.0 - MODELOS DE TURBINAS FRANCIS COM CONDUTO SIMPLES

Os modelos de turbinas hidráulicas tem sido estudados por diversos autores, sendo citados em diversos livros e trabalhos (3),(4). Nesse estudo, foram analisados três modelos, detalhados a seguir.

O Modelo 1 é não linear, e leva em conta o efeito da fricção, efeito normalmente desconsiderado em estudos de estabilidade. Utiliza também uma curva para gerar a posição do servomotor (curva abertura x potência). Utilizando esse modelo, são possíveis análises levando em conta variações de nível da barragem, como o estudo detalhado da sobrevelocidade do conjunto gerador-turbina, e das sobrepressões presentes em casos de rejeições de carga. A desvantagem na utilização do Modelo 1 está no número de parâmetros a serem observados e identificados, trazendo dificuldades na inicialização do modelo computacional. A Figura 1 apresenta a topologia do Modelo 1.

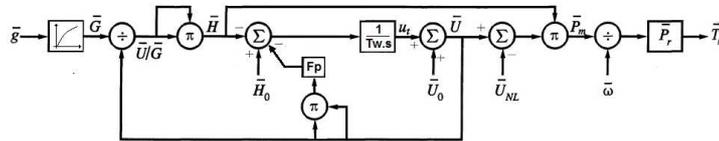


FIGURA 1 - Modelo 1

O Modelo 2 também é não linear, trazendo algumas simplificações em relação ao Modelo 1. As simplificações são basicamente a linearização da curva abertura x potência, e a eliminação do efeito da fricção. Ambas as simplificações tornam o modelo de mais fácil implementação computacional. Muitos estudos poderão ser realizados utilizando-se o Modelo 2, facilitando a inicialização do algoritmo, sendo inclusive o mais recomendado para a maior parte dos estudos. A Figura 2 apresenta a topologia do Modelo 2.

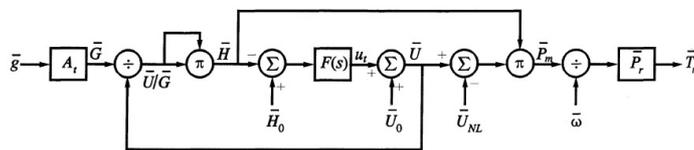


FIGURA 2 - Modelo 2

O Modelo 3 aqui apresentado é o modelo linear, sem perdas, tradicionalmente utilizado na maior parte dos estudos. Por ser muito simples de modelar, e por apresentar resposta bastante razoável em diversos estudos, é ainda o principal modelo utilizado em softwares dedicados, como o ANATEM (10), bem como o preferido na maioria dos estudos acadêmicos. Sua aplicação é válida para pequenas perturbações e para baixas frequências (1),(4). A Figura 3 apresenta a topologia do Modelo 3.

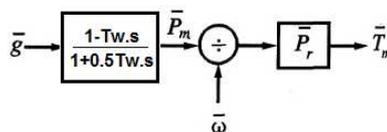


FIGURA 3 - Modelo 3

### 3.0 - ESTUDOS DE REGULAÇÃO PRIMÁRIA - ENSAIO DE ISOLAÇÃO SIMULADA

Para avaliar a resposta de um controlador de velocidade na regulação primária, a IEEE (5) e IEC (6) sugerem algumas técnicas, como por exemplo, o ilhamento da unidade com carga resistiva, através de simulações computacionais, teste de rede isolada simulada, entre outros. O ensaio mais prático e viável de se realizar é o de simulação de rede isolada. Este ensaio é uma alternativa bastante eficaz de avaliar a resposta da unidade geradora, mesmo estando em operação interligada (7).

O teste consiste em injetar um sinal na referência de frequência do controle de velocidade. Esse sinal representa os desvios de frequência que ocorreriam em uma situação de ilhamento. Esse sinal injetado é calculado a partir da própria potência elétrica, medida na saída da unidade, subtraída de uma carga simulada. É exatamente na carga simulada que se aplicam os distúrbios. A IEEE e IEC apresentam o referido teste com maior detalhamento. Alguns fabricantes de regulador de velocidade disponibilizam esse ensaio no próprio equipamento, não sendo necessários dispositivos externos para realização desse ensaio (8). Outros reguladores necessitam de um aparato externo para sua realização (9).

Um ponto importante é que, através desse teste, os efeitos dinâmicos dos componentes reais do sistema hidráulico podem ser observados, como por exemplo, o efeito da coluna d'água, a dinâmica do controlador (estatismo transitório, permanente e zona morta), atuadores, etc.

Para apresentar este ensaio os modelos aqui simulados serão confrontados com curvas obtidas em campo através do ensaio de simulação de rede isolada, entre outros testes e simulações.

#### 3.1 Identificação através do teste de rede isolada

O teste de simulação de rede isolada foi analisado em diferentes níveis de carregamento da unidade geradora. A Figura 4 apresenta comparações entre os diferentes modelos de turbina-conduto apresentados. O sinal de frequência é gerado no teste realizado em campo, sendo esse sinal o dado de entrada dos modelos.

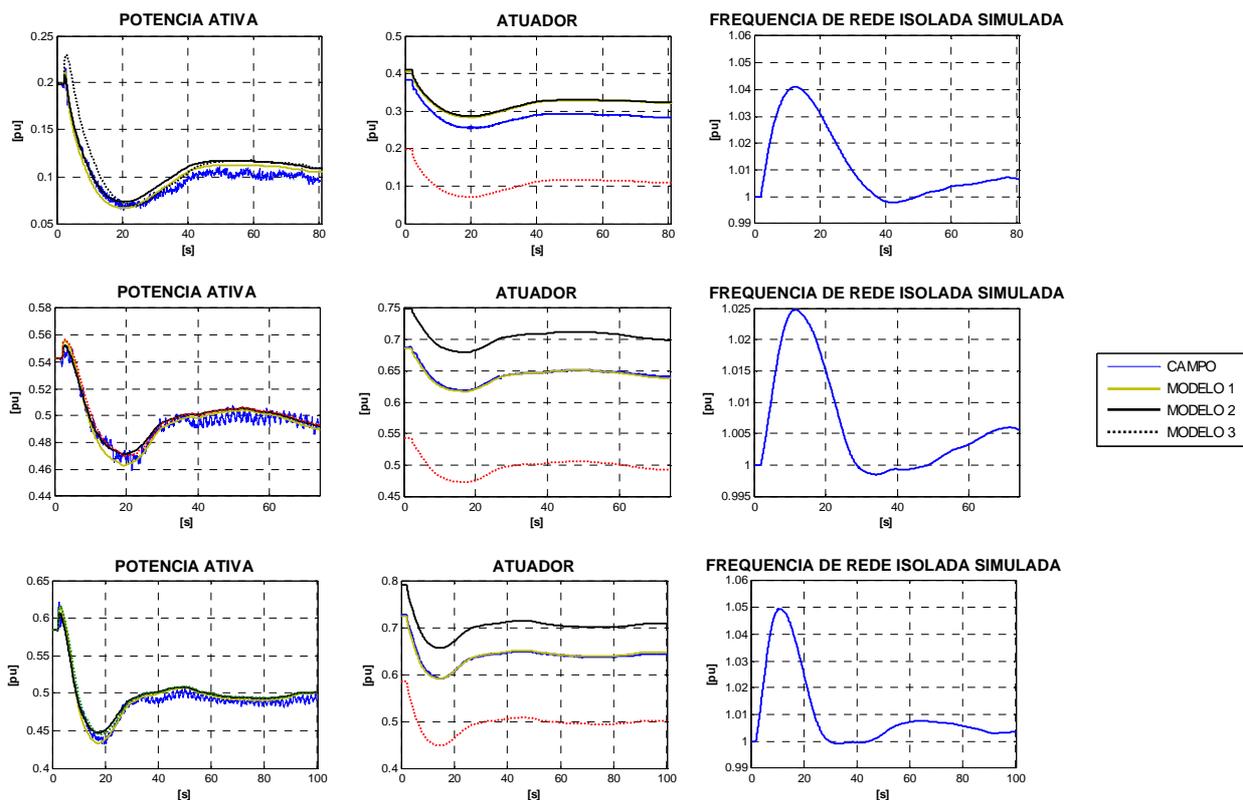


FIGURA 4 – Ensaio de identificação – comparação dos modelos em isolação simulada

Da Figura 4 percebe-se que o sinal de potência elétrica possui somente pequenas discrepâncias entre os diferentes modelos, com diferença mais evidente no Modelo 3 em carga baixa. Já o sinal do atuador possui diferenças consideráveis. Tal fato poderá ser desprezado na maioria dos estudos, porém, em casos específicos, tal efeito trará imprecisões caso não seja utilizado modelo adequado. De forma geral, fica evidente que o Modelo 1 é o

que melhor representa o sistema físico, mostrando melhor aderência aos sinais de campo tanto para o sinal de potência ativa, como para o sinal de posição do atuador.

### 3.2 Comparação entre Modelo 2 e Modelo 3 com carga baixa e alta da turbina

Com o objetivo de comparar as respostas dos modelos 2 e 3, foram testadas, através de simulação de rede isolada, variações bruscas de carga de 10% da máquina, estando operando com carga baixa e com carga alta. As respostas obtidas estão apresentadas na Figura 5. O Modelo 1 não foi simulado pois apresenta respostas semelhantes ao Modelo 2 em relação aos sinais de frequência e potência ativa. Observa-se que, diferentemente do teste anterior, onde a curva de frequência do campo era utilizada como dado de entrada dos modelos simulados, os desvios de frequência desse teste são dados de saída de cada simulação.

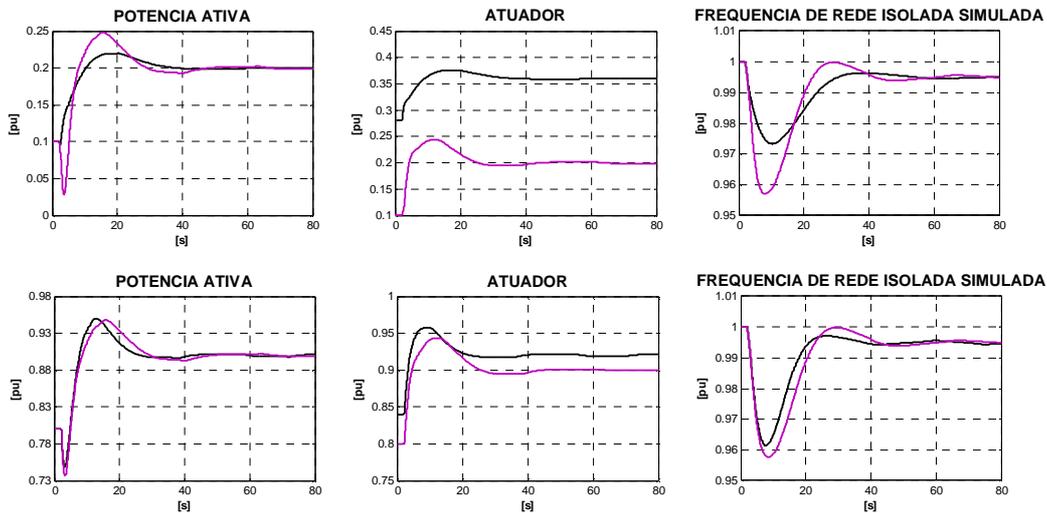


FIGURA 5 – Comparação entre Modelo 2 (preto) e Modelo 3 (roxo) com carga baixa e carga alta

Fica evidente que o Modelo 3 (linear sem perdas) apresenta sempre a mesma resposta, independente do nível de carga. Já o modelo 2 apresenta dinâmicas diferentes em função do despacho de carga ativa da unidade geradora. A pior condição de rede isolada é justamente com carga mais alta, onde o efeito da coluna d'água fica mais presente. Nesse ponto de operação os modelos possuem respostas quase que semelhantes.

### 3.3 Influência do nível na regulação primária

O nível da barragem, em uma central hidrelétrica, é um dos parâmetros que influencia diretamente a potência mecânica de saída de uma turbina hidráulica. Algumas centrais operam com níveis muito próximos ao nominal, sendo que outras sofrem variações maiores, normalmente quando operam em cascata com outras usinas.

A diminuição do nível provoca redução da queda útil, causando redução do rendimento da turbina em função de perda de pressão. O regulador de velocidade, quando sincronizado, vai seguir a referência de potência elétrica ajustada pelo operador. Quando o nível sofrer alteração, para cima ou para baixo, o regulador de velocidade vai mandar abrir ou fechar o atuador para que haja uma compensação da perda de pressão ocasionada pela alteração do nível. Essa correção tem o intuito de manter a potência elétrica entregue pela unidade geradora no valor determinado pela operação.

Os modelos 1 e 2 permitem a entrada do nível como uma variável nas simulações. Para avaliar o impacto dessa variável, utilizando o Modelo 2, foram realizadas simulações de rede isolada frente a uma perturbação de 10% de carga. Foram alterados os parâmetros relativos ao nível no modelo ( $H_0$ ), 5% para cima do nominal, 5% e 10% para baixo, em relação ao nominal, todos considerando o mesmo ponto de operação da máquina. A Figura 6 apresenta as curvas geradas.

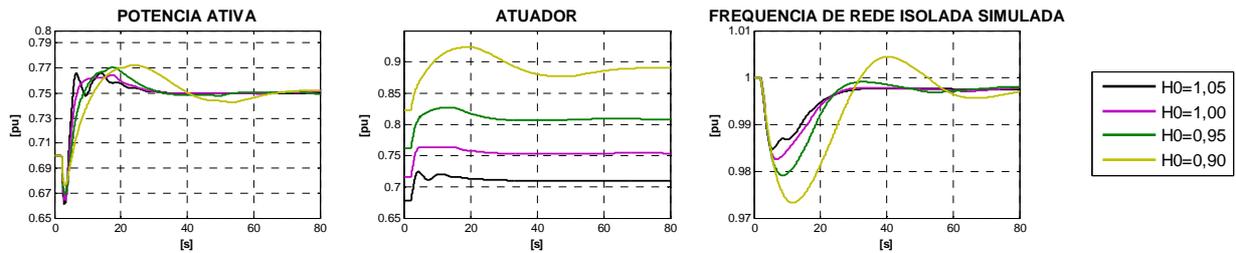


FIGURA 6 – Variação do nível da barragem

Observa-se que, quando o nível está muito abaixo do nominal, como é o caso com  $H_0 = 0,9$ , o atuador precisou abrir mais do que nos outros casos, apresentando maior dificuldade para o controle de frequência/potência. Tal conclusão é muito interessante, ainda mais num contexto onde o Brasil sofreu nos últimos meses, com níveis de importantes hidrelétricas bastante baixos, causando redução na geração, e necessitando maior geração termelétrica.

Ressalta-se novamente que para tal estudo, não é possível utilizar o Modelo 3, o qual não considera o efeito da queda líquida, e que poderá gerar resultados incorretos em estudos de regulação primária.

#### 4.0 - REPOTENCIAÇÃO DE UNIDADES GERADORAS – FOCO NA SOBREPRESSÃO E SOBREVELOCIDADE

A repotenciação (ou repotencialização) de unidades geradoras em usinas hidrelétricas mais antigas é uma opção muito interessante para evitar pesados investimentos bem como consideráveis impactos ambientais pela construção de novas usinas. A partir da recuperação ou substituição dos atuais equipamentos por equipamentos mais modernos e eficientes, principalmente a turbina e o gerador, pode-se chegar a um aumento de 20 a 30% na geração de cada unidade geradora. Outros meios de aumento de geração com a mesma casa de força são realizados considerando um incremento na vazão de uma dada unidade geradora, por exemplo.

Unidades geradoras que venham a sofrer repotenciação necessitam de estudos técnicos para avaliar se o conjunto gerador-turbina e conduto forçado podem suportar os esforços mecânicos frente a rejeições de carga para a nova potência. Esses esforços são, principalmente, os de sobrevelocidade e sobrepressão. Nesses estudos são avaliados se os tempos de fechamentos do atuador estão adequados, a necessidades de aumentar o volante de inércia, dentre outros.

O exemplo de aplicação de tal estudo foi realizado utilizando-se o Modelo 1. Foi considerado o modelo do conduto forçado, desprezando o controle de velocidade, utilizando como dado de entrada a curva de campo do atuador hidráulico.

A primeira etapa desse tipo de estudo consiste na validação do modelo através de ensaios de campo. Posteriormente, foram realizadas simulações para avaliação dos casos de possível sobrepressão e/ou sobrevelocidade.

#### 4.1 Ensaio de Campo para validação do modelo

##### 4.1.1 Ensaio de Rampa de Carga

Através de ensaios de rampa de tomada de carga, e tomada de carga através de patamares limitados, é possível avaliar os efeitos da fricção. A fricção provoca uma perda de pressão à medida que o atuador abre. A curva abertura x potência também é avaliada e levantada através desses ensaios.

A Figura 7 ilustra uma rampa de 0 a 100% de carga, enquanto que a Figura 8 apresenta uma rampa em patamares de 10 em 10%.

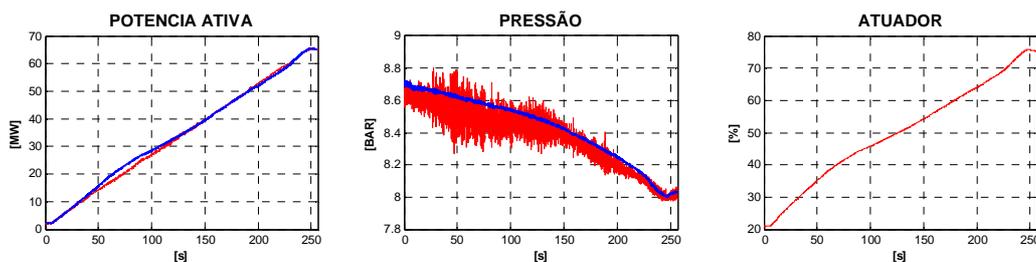


FIGURA 7 - Rampa de carga - Campo (vermelho) x Simulado (azul)

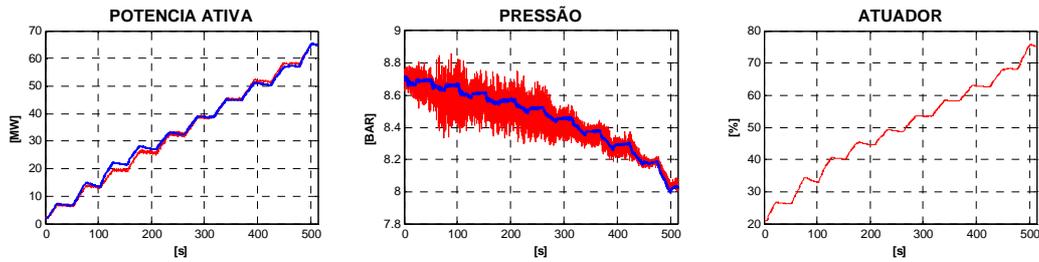


FIGURA 8 - Rampas de carga - Campo (vermelho) x Simulado (azul)

Percebe-se considerável aderência dos sinais simulados aos sinais obtidos em campo. Com isso, considera-se que o modelo possui razoável fidelidade com o sistema físico.

#### 4.1.2 Ensaio de Rejeição de carga

Através dos ensaios de rejeição de carga é possível avaliar a sobrepressão e sobrevelocidade do conjunto turbina-gerador. A Figura 9 apresenta um ensaio de rejeição de carga, estando a máquina com carregamento de 50%, comparando curvas adquiridas em campo e simuladas. A Figura 10 apresenta o ensaio de rejeição de 75% de carga e a Figura 11 uma rejeição de 100% de carga.

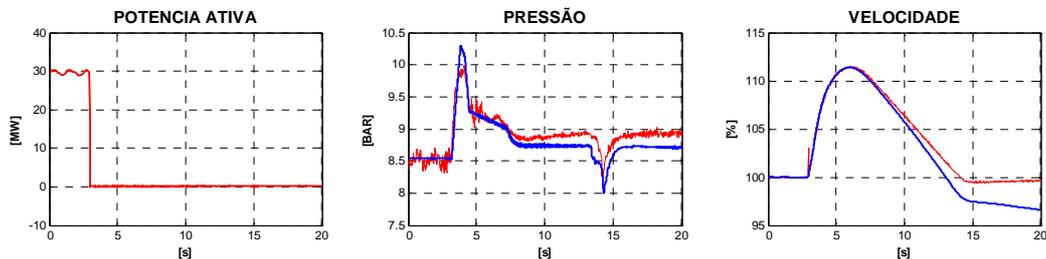


FIGURA 9 - Rejeição de 50% de carga - Campo (Vermelho) x Simulado (azul)

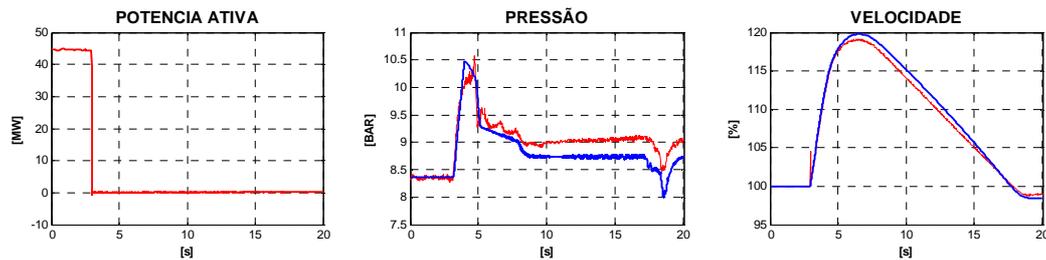


FIGURA 10 - Rejeição de 75% de carga - Campo (Vermelho) x Simulado (azul)

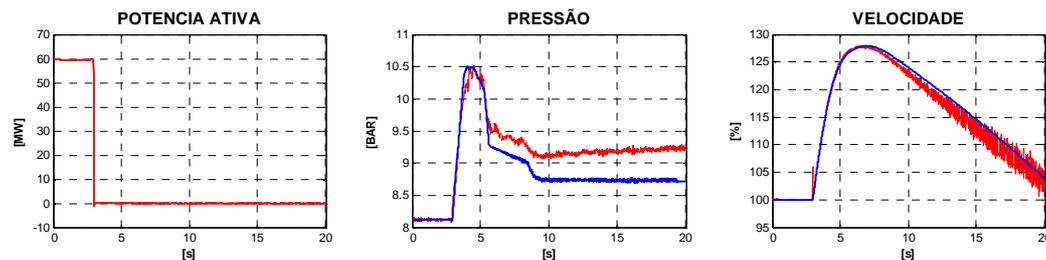


FIGURA 11 - Rejeição de 100% de carga - Campo (Vermelho) x Simulado (azul)

Novamente, percebe-se considerável aderência dos sinais simulados aos sinais obtidos em campo, confirmando que o modelo possui razoável fidelidade com o sistema físico.

#### 4.2 Estudos dos limites de sobrepressão e sobrevelocidade para nova potência

Com o modelo validado, é possível analisar os efeitos da sobrepressão e sobrevelocidade para um novo patamar de potência. O novo patamar de potência equivale a 115% da potência original.

Para esse estudo, foram analisados os efeitos da influência do nível. A Figura 12 apresenta as simulações de rejeição de carga com nível mínimo ( $H_0 = 94\%$ ), a Figura 13 com nível nominal ( $H_0 = 100\%$ ) e a Figura 14 com o nível máximo ( $H_0 = 105\%$ ).

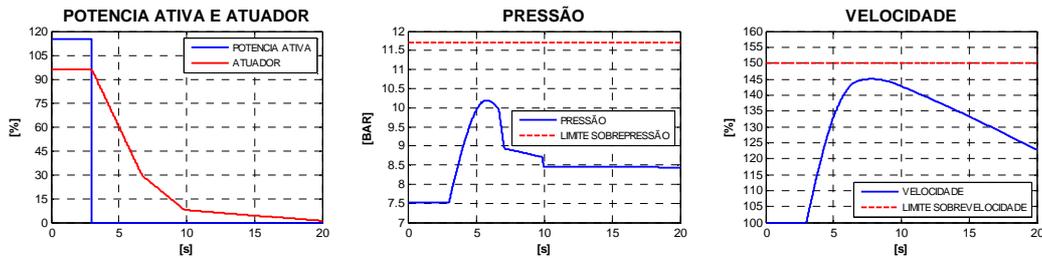


FIGURA 12 - Rejeição de 115% de carga (repotencializada) com nível em 94%

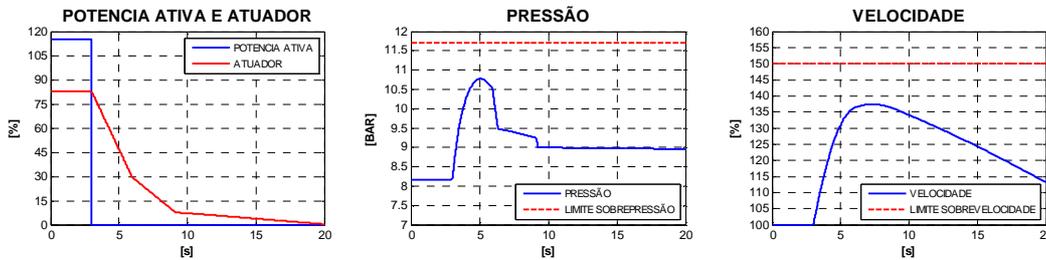


FIGURA 13 - Rejeição de 115% de carga (repotencializada) com nível em 100%

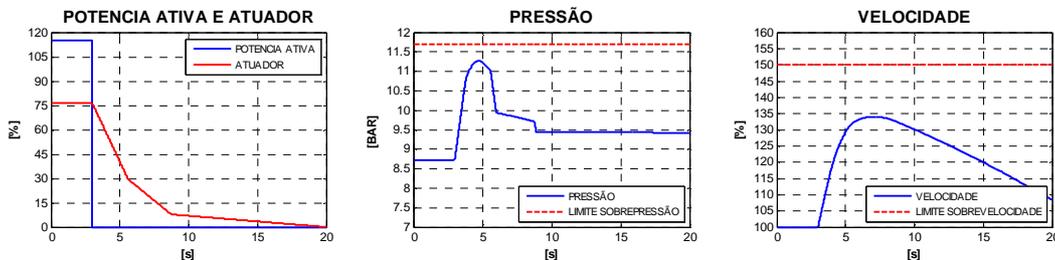


FIGURA 14 - Rejeição de 115% de carga (repotencializada) com nível em 105%

Nos três casos analisados, os limites de sobrepressão e sobrevelocidade não foram atingidos. Um ponto interessante de analisar é que, para uma mesma potência ativa, o patamar considerado do nível provocou aumento do valor absoluto da sobrepressão, e obteve-se uma menor sobrevelocidade. Enquanto que para o menor nível, a sobrevelocidade foi maior.

O impacto do reajuste dos tempos de fechamento do atuador e alterações da inércia também são possíveis de serem realizados com esse tipo de estudo.

Recomendações de ajustes do regulador de velocidade, como por exemplo, limites máximos de abertura em virtude do nível, também são obtidos com esses estudos.

## 5.0 - CONCLUSÕES

A modelagem do conduto forçado de uma turbina hidráulica é vital na avaliação da estabilidade do sistema. A representação clássica, linear e sem perdas do conjunto turbina-conduto hidráulico, não representa o comportamento real para frequências mais altas, para grandes perturbações e não permite também avaliar adequadamente o comportamento em uma ampla faixa de operação, o que pode levar a resultados e conclusões equivocadas.

Para simular adequadamente o conduto forçado, uma representação mais detalhada do que a convencional é desejada. Todavia, há uma grande variedade de modelos para representação da dinâmica das turbinas hidráulicas em estudos de regulação de frequência. A topologia que melhor representa o sistema físico exige, não só o conhecimento do sistema que está sendo modelado, como também ensaio de campo para comprovação que a escolha está adequada.

Somente através da validação com ensaios de campo é possível a aplicação de um modelo mais completo para estudos de regulação primária de frequência, e de repotencialização de unidades geradoras.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CHOO, Yin Chin, MUTTAQI, Kashem M., NEGNEVITSKY, Michael. Modelling of Hydraulic Turbine for Dynamic Studies and Performance Analysis. Australia.
- (2) KOSTEREV, Dmitry, Hydro Turbine-Governor Model Validation in Pacific Northwest. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19, NO. 2, MAY 2004. EUA.
- (3) HYDRAULIC TURBINE AND TURBINE CONTROL MODELS FOR SYSTEM DYNAMIC STUDIES. Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies. Transactions on Power Systems, Vol. 7, NO. 1, February 1992. EUA.
- (4) KUNDUR, P. Power System Stability and Control. New York, USA: McGraw-Hill Professional, 1994. EUA.
- (5) IEEE Std 1207-2011, IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units. EUA.
- (6) IEC60308 – Hydraulic Turbines – Testing of control systems. CEI/IEC 60308:2005. Suíça.
- (7) SOARES, J.M.C. Identificação Experimental, Simulação e Ajuste de Reguladores de Velocidade de Usinas Hidrelétricas com Verificação em Testes de Campo. Dissertação de Mestrado. UFSM, Santa Maria, 1982. Brasil.
- (8) RVX POWER - Manual de Operação e Manutenção. Projeto Padrão da Linha POWER. REIVAX S/A, 2014. Brasil.
- (9) BUHLER, C., PAIVA, R.B.D. Dedicated Digital System Testing and Modeling in Power Systems. I Latin American Hydro Power and Systems, 2015. Argentina.
- (10) –CEPEL. Manual do Usuário do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – ANATEM. Fevereiro, 2015. Brasil.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Autor de contato:



Nome: Rafael Bertolini de Paiva  
 Local/Ano nascimento: Florianópolis/SC, 1982.  
 Formação: Graduação em Engenharia Elétrica (UFSC, 2009), Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (UNIFEI, 2014)  
 Experiência profissional: Atua desde 2009 na REIVAX como engenheiro, tendo atuado em diferentes funções: engenheiro de campo (testes e comissionamento de sistemas de proteção e regulação), estudos especiais (modelagem de unidades geradoras e controladores), estudos de transitórios eletromecânicos, seletividade e curto-circuito.

Autor 2:



Nome: Cristiano Bühler  
 Local/Ano nascimento: Passo Fundo/RS, 1983.  
 Formação: Engenharia Elétrica (UFSC, 2006), Mestrado em Engenharia Elétrica (UFSC, em andamento)  
 Experiência profissional: Atua desde 2007 na REIVAX como engenheiro, tendo atuado como engenheiro de campo (testes e comissionamento), estudos especiais (modelagem de unidades geradoras e controladores), e engenheiro de projetos. Atualmente atua como engenheiro com foco na capacitação técnica para clientes.

## Autor 3:

Nome: Paulo Marcos Pinheiro de Paiva

Local/Ano nascimento: Sabará/MG, 1949.

Formação: Graduação em Engenharia Elétrica (UFMG, 1973); Pós graduação em Controle de Sistemas Elétricos-CCSE na UFSC em 1978.

Experiência profissional: Iniciou nas Usinas da ELETROSUL em 1974, onde foi chefe da divisão de Estudos e Ensaio de Sistemas de Controle . Em 1986, se transferiu para a ENGEVIX e em 1987, para a CEMIG, atuando como consultor em Sistemas de Controle de Geração. Desde 1988 é sócio da REIVAX, atuando atualmente como Diretor de Negócios. É autor ou coautor de diversos artigos técnicos, publicados em seminários e revistas.

## Autor 4:

Nome: João Marcos Castro Soares

Local/Ano nascimento: Rosário do Sul/RS, 1954.

Formação: Engenharia Elétrica (UFSM, 1976), Mestrado em Engenharia Elétrica (UFSM, 1982)

Experiência profissional: Iniciou sua carreira como professor de sistemas de controle na UFSM em 1977. E, 1978 transferiu-se para a ELETROSUL, onde atuou no projeto de sistemas de controle para centrais de geração. Fundou a REIVAX em 1987, onde desempenhou diversas atividades. Atualmente é diretor de P&D da REIVAX. É autor ou coautor de diversos artigos técnicos, publicados em seminários e revistas.

## Autor 5:

Nome: Lucas Manso da Silva

Local/Ano nascimento: São Paulo/SP, 1989.

Formação: Graduação em Engenharia Elétrica (UFSC, 2012)

Experiência profissional: Atua como engenheiro na REIVAX desde 2013, atuando principalmente como estudos especiais (modelagem de unidades geradoras e controladores), estudos de transitórios eletromecânicos e engenheiro de campo (testes e comissionamento).