

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PNEUMÁTICO INOVADOR PARA AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

VINÍCIUS VIGOLO(1); GREGORI PICOLOTTO CONTERATO(1); TALLES AUGUSTO BRAGAGNOLO SPADA(1); LEONARDO AUGUSTO WEISS(2); PEDRO GAYER DE ARAUJO(3); LEONARDO LEONCINI(3); VICTOR JULIANO DE NEGRI(1)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA(1); REIVAX(2); CTG BRASIL(3)

RESUMO

Neste informe técnico será apresentado os principais resultados de um projeto piloto para aplicação da tecnologia pneumática para controle e automação de turbinas hidráulicas. O projeto consiste na identificação dos requisitos de projeto, desenvolvimento e análise de soluções baseadas em tecnologia pneumática e instalação do projeto piloto em uma turbina de 435 kW. Os resultados obtidos comprovaram a capacidade do sistema pneumático em atender os requisitos da aplicação. Além de resultar em um sistema 30% mais econômico, a solução reduz drasticamente o uso de óleo mineral na geração de energia elétrica, contribuindo com as atuais demandas por energias limpas e sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas pneumáticos, regulação de velocidade, válvula de adução, sustentabilidade.

1.0 - INTRODUÇÃO

As características hidrográficas brasileiras favorecem a produção de energia elétrica por meio da hidrogenação, a qual representa cerca de 62% da matriz energética nacional [1] e coloca o Brasil em terceiro lugar na classificação global em geração de energia por fontes renováveis [2]. Entretanto, toda fonte de energia produz algum impacto ambiental, seja ela renovável ou não, e no caso da geração por hidrelétricas, os principais impactos estão relacionados com a inundação causada pelo reservatório de água, produzindo dióxido de carbono e metano resultante da decomposição da biomassa na área alagada e destruição da vida animal [3].

Desta forma, o desenvolvimento de plantas geradoras com pequenas capacidades, no Brasil denominadas de PCHs e CGHs, vem sendo abordado como uma alternativa mais sustentável e com menor impacto ambiental [3, 4]. Atualmente, na matriz energética brasileira existem 1.164 empreendimentos em operação classificados com PCHs e CGHs, correspondendo a um total de 3,58% da potência total outorgada pela ANEEL, além de 123 novos empreendimentos em construção ou para serem construídos [1], demonstrando a relevância desta fonte de energia no cenário nacional.

Dentro deste contexto, o Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) vem desenvolvendo uma linha de pesquisa para a automação e controle de PCHs visando a aplicação da tecnologia pneumática, a qual é conhecida pela sua excelente relação de custo-benefício, fácil manutenção e baixo impacto ambiental. Os trabalhos desenvolvidos até então possuem foco no controle de posição do regulador de velocidade, onde soluções que fazem uso de válvulas proporcionais [5], válvulas *on/off* com modulação por PWM [6] e também aplicações com foco em eficiência energética [7] foram desenvolvidas.

Recentemente, um projeto de pesquisa entre as empresas CTG Brasil e Reivax Automação e Controle, em colaboração com o LASHIP, tem buscado aprimorar esta tecnologia de modo que a mesma possa ser empregada em um projeto piloto. Estudos prévios resultantes dessa cooperação exploraram a modelagem matemática e análise de uma concepção baseada em válvulas proporcionais reguladoras de pressão para o controle do distribuidor da turbina [8], o uso deste tipo de válvulas possui vantagens econômicas e de disponibilidade de fabricantes. Além disso, a atuação da válvula de adução por meio da tecnologia pneumática é discutida em [9], onde a utilização de um macaco hidropneumático se mostrou como a alternativa mais alinhada com as especificações da aplicação. Ambas as soluções foram avaliadas por meio de simulações dinâmicas e também em bancadas de testes, demonstrando excelente desempenho dinâmico e capacidade de atendimento aos requisitos de projeto.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento do projeto piloto para automação e controle de uma turbina Francis com 438 kVA de potência instalada, incluindo a definição dos requisitos de projeto, descrição da solução e apresentação dos resultados operacionais. Deste modo, demonstra-se que é possível utilizar um sistema pneumático de automação e controle para PCHs com desempenho equivalente aos convencionais,

assegurando uma operação mais limpa, sustentável, de baixo custo e com maior facilidade de instalação e manutenção.

2.0 - REQUISITOS DE PROJETO

Os maiores desafios para o controle e automação de uma turbina hidráulica estão relacionados ao regulador de velocidade, o qual necessita de um controle em malha fechada, e também a abertura da válvula de adução, a qual demanda uma elevada força de atuação devido à existência do contrapeso e pressão no conduto. Ambos os requisitos de projeto são dependentes da aplicação onde os sistemas serão empregados. Neste caso, o projeto piloto será instalado na Unidade de Geração Auxiliar (UG-AUX) da Usina Hidrelétrica de Salto Grande - SP, a qual está, atualmente, sob concessão da empresa CTG Brasil. A unidade geradora é composta por uma turbina Francis horizontal e um gerador síncrono. Com uma queda d'água média de 18,5 m, a unidade geradora totaliza 438 kW de potência instalada.

2.1 - Regulador de velocidade

Para o regulador de velocidade, os principais requisitos estão relacionados com o comportamento do distribuidor da turbina Francis, que nesta aplicação, requer um sistema de dupla atuação linear com 131 mm de deslocamento. Além disso, os seguintes requisitos foram determinados:

- Fechamento de emergência: Em caso de falta de energia ou em condições de emergência, o sistema de controle precisa ser capaz de fechar o distribuidor.
- Tempo mínimo de fechamento: O fechamento do distribuidor não pode ser muito rápido, de modo a evitar a ocorrência de golpe de aríete na comporta ou no conduto forçado, e de acordo com o fabricante, o tempo mínimo de fechamento de 100% do distribuidor deve ser maior que 2.5 segundos.
- Tempo mínimo de abertura: A abertura do distribuidor não pode ser muito rápida, de modo a evitar a ocorrência de subpressão no conduto forçado. Para esta aplicação, o tempo mínimo para 100% de abertura do distribuidor é estabelecido pelo fabricante como 5 segundos;
- Sobre velocidade: Devido à inércia do grupo gerador, quando ocorre uma rejeição de carga a velocidade rotacional da turbina começa a subir e para que evitar danos ao equipamento, é definido um valor limite, o qual é monitorado pelo controlador e caso atingido, leva a máquina a condição de *trip*, fechando o distribuidor e parando a máquina. O limite superior foi definido pelo fabricante do equipamento como sendo 130% da velocidade nominal. A norma IEEE 1207 (2004) recomenda valores de 140 a 190% da velocidade nominal.
- Frequência de regime permanente: A frequência da energia elétrica produzida pelo gerador será definida pela velocidade rotacional do gerador. Quando o gerador é conectado ao sistema elétrico nacional, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) define uma variação aceitável de +/- 0,5 Hz para a frequência da rede elétrica [10].
- Desempenho dinâmico: O Operador Nacional do Sistema Elétrico define tempos específicos para geração em frequências que ultrapassem o limite de +/- 0,5 Hz [10]. O sistema de atuação do distribuidor deverá ser capaz de atender os tempos de exposição a desvios de frequência definidos pelo ONS, mesmo quando em rede isolada.
- Força de atuação: A força exercida pela vazão de água nas pás do distribuidor varia com o curso do atuador, sendo que a força máxima é esperada entre 80 e 90% da abertura total do distribuidor. Nesta aplicação, estima-se uma força máxima de, aproximadamente, 26 kN [8].

2.2 - Válvula de adução

A válvula de adução é do tipo borboleta, possui 900 mm de diâmetro e um contrapeso de 290 kg fixados em um braço de alavanca com 645 mm. A atuação da válvula é feita por um braço de alavanca que possui 250 mm. A válvula de adução não conta com válvula *by-pass*, logo, a força de atuação deverá ser capaz de superar o diferencial de pressão entre a montante e jusante da válvula. Os principais requisitos para a válvula de adução são:

- Força de atuação: De acordo com o fabricante da válvula, a força de atuação para abertura deve ser 153 kN;
- Curso: A válvula de adução com o atual braço de alavanca requer um curso de atuação de 355 mm para abertura completa da mesma;
- Tempo de mínimo de abertura: De modo a evitar subpressão no conduto forçado, o fabricante recomenda um tempo de abertura entre 60 e 180 segundos para a válvula de adução;
- Tempo de mínimo de fechamento: Não especificado pelo fabricante, porém, a norma ANSI/AWWA C504-15 [11] sugere um tempo mínimo de fechamento entre 2 e 4 segundos por polegada do diâmetro nominal da válvula para evitar golpe de aríete, ou seja, entre 70 e 140 segundos para esta aplicação;
- Fechamento automático: O equipamento deve ser capaz de fechar automaticamente, independente da fonte de ar comprimido e energia elétrica. Além disso, a velocidade de retorno precisa ser ajustável em campo.

3.0 - SISTEMA PROPOSTO

Diversas concepções e tecnologias foram avaliadas como possíveis soluções para o acionamento do distribuidor e da válvula de adução, tendo como base para a tomada de decisão, o atendimento aos requisitos apresentados na seção 2, bem como a viabilidade econômica da solução. Discussões sobre as possíveis soluções analisadas são apresentadas em [12] e [8].

Na Figura 1 - (a) é apresentado o circuito pneumático simplificado com os principais componentes para o regulador de velocidade. Para o controle de posição, o uso de válvulas proporcionais reguladoras de vazão (1.1 e 1.2) se mostrou mais adequado, pois esse modelo de válvulas resulta em um melhor desempenho dinâmico e baixo erro de regime permanente. Dois atuadores diferenciais de dupla ação (1.3 e 1.4) são responsáveis pela movimentação do distribuidor por meio da aplicação de forças simétricas no anel de regulação. As câmaras dos atuadores são interconectadas, de modo a garantir a movimentação rotacional do distribuidor. A posição em tempo real dos atuadores é mensurada por um transmissor de posição (1.5) e enviada ao controlador. Válvulas de emergência foram instaladas entre as válvulas proporcionais e os atuadores pneumáticos, de modo que em uma eventual condição de emergência ou falta de energia elétrica, o distribuidor seja movimentado para a posição fechada. Além disso, válvulas reguladoras de vazão permitem a regulação em campo da velocidade máxima de abertura e fechamento. A malha de controle (Figura 1 - (b)) converte o erro de posição em um sinal de referência para as válvulas proporcionais.

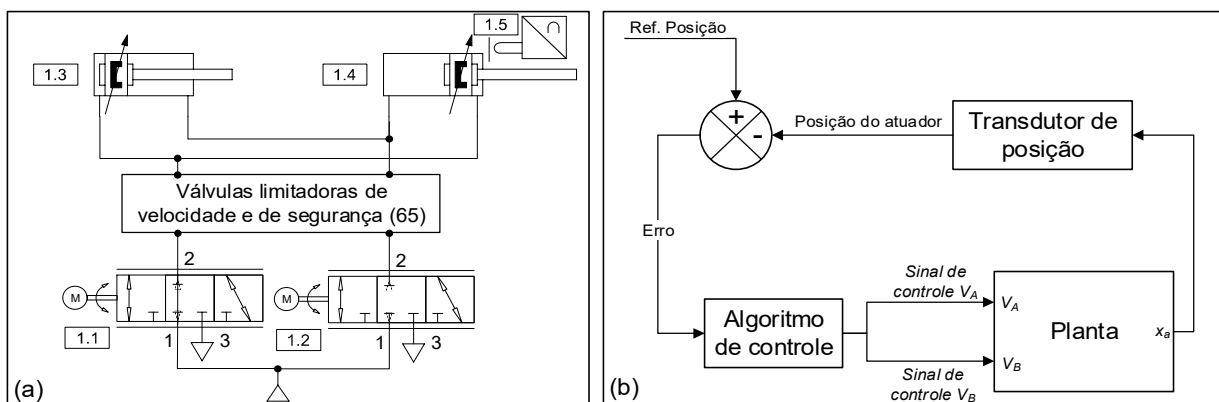


FIGURA 1 - Sistema de atuação pneumático para o regulador de velocidade; (a) Circuito pneumático; (b) Malha de controle.

Para atuação da válvula de adução foi desenvolvido um projeto específico de um macaco hidropneumático em conjunto com a empresa Bovenau, fabricante de macacos hidráulicos, no qual foram implementadas novas funcionalidades de modo a atender os requisitos de projeto. Na Figura 2 - (a) é apresentado o circuito hidráulico-pneumático simplificado da solução desenvolvida. Um conjunto de duas bombas pneumáticas é utilizado para aumentar a velocidade de acionamento. Uma válvula hidráulica, normalmente aberta, permite o controle remoto do equipamento, além de garantir o fechamento da válvula de adução em caso de emergência ou falta de energia elétrica. Uma válvula reguladora de vazão é utilizada para regular a velocidade de retorno e uma válvula de acionamento manual é utilizada como redundância para acionamento do retorno do macaco hidropneumático.

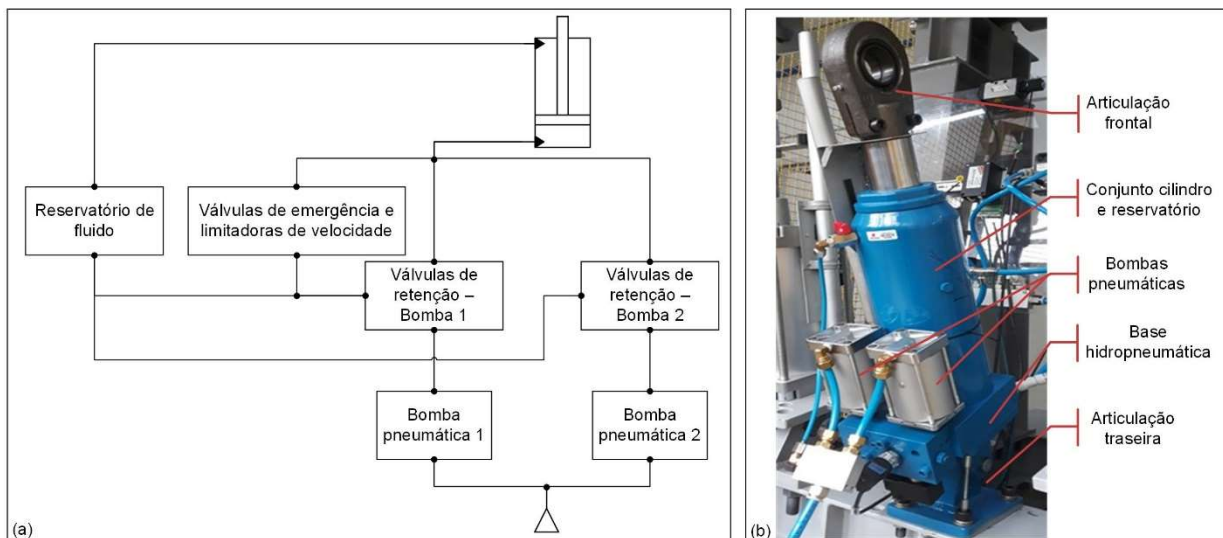


FIGURA 2 - Macaco hidropneumático; (a) Diagrama hidráulico-pneumático; (b) Protótipo

O primeiro protótipo desenvolvido pela fabricante é apresentado na Figura 2 – (b), onde é possível observar as articulações, necessárias para fixação na válvula de adução, bem como a disposição espacial dos componentes hidráulicos e pneumáticos, demonstrando que a solução é compacta, robusta e tecnicamente viável.

4.0 - O PROJETO PILOTO

As soluções apresentadas para a atuação do regulador de velocidade e da válvula de adução foram avaliadas por meio de simulações dinâmicas e também, por meio de testes experimentais realizados em uma bancada de testes desenvolvida com a finalidade de simular condições reais de operação de um regulador de velocidade e de uma válvula de adução. Os resultados obtidos evidenciaram a capacidade das soluções propostas em atender os requisitos apresentados na seção 2. Com base nestes resultados, foi dado início ao desenvolvimento do projeto piloto, cujo objetivo é instalar um sistema puramente pneumático para automação e controle da UG-AUX da Usina Hidrelétrica de Salto Grande - SP.

A seleção dos atuadores pneumáticos e válvulas proporcionais para o distribuidor foi feita com base no método do ponto de operação [13]. Com isso, dois atuadores assimétricos, modelo 40M3L160A150, da fabricante CAMOZZI foram selecionados. Já para as válvulas proporcionais foi selecionado o modelo LRWD2-36-5-A-2R do mesmo fabricante. Para a válvula de adução foi utilizado o macaco hidropneumático desenvolvido em conjunto com a empresa BOVENAU, o qual possui capacidade máxima de atuação de 294 kN. A distribuição espacial dos componentes pneumáticos no local de operação é apresentada na Figura 3 – (a), bem como algumas imagens do grupo gerador após a instalação dos componentes (Figura 3 – (b, c, d)).

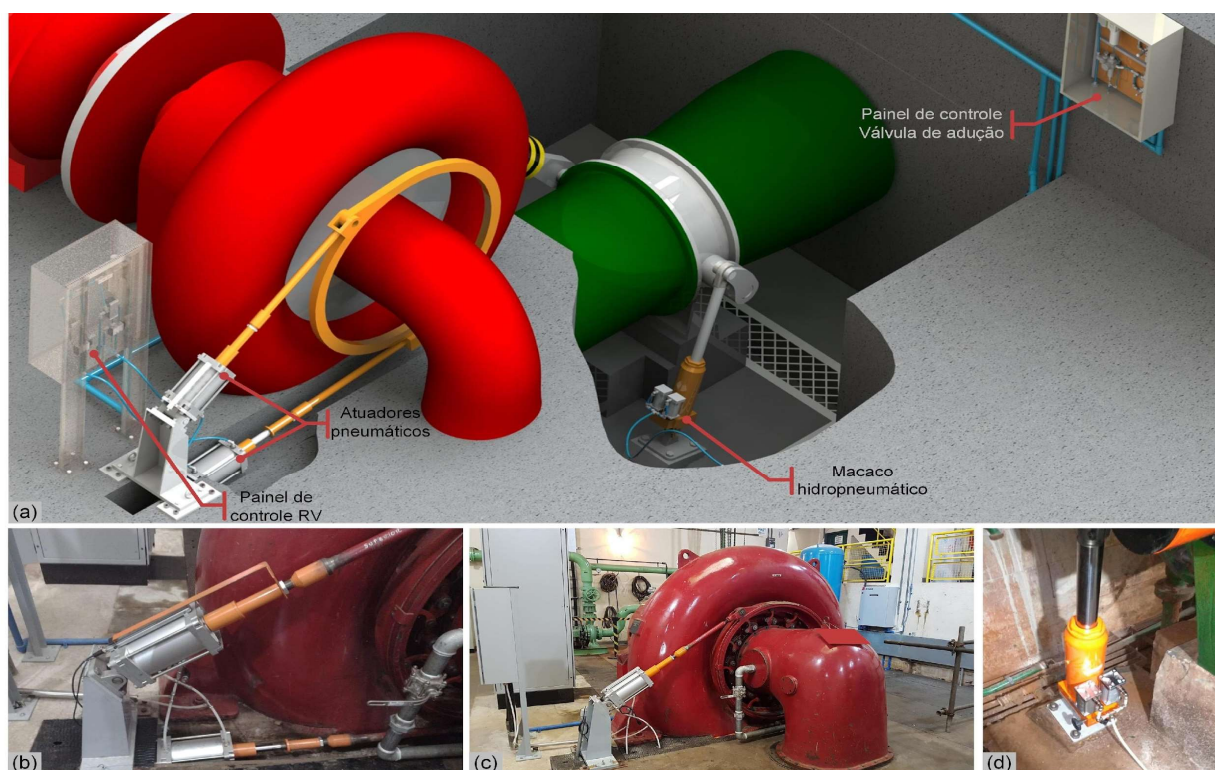


FIGURA 3 - Projeto Piloto: (a) Visão geral da solução pneumática; (b) Atuadores do distribuidor; (c) Vista frontal da turbina Francis; (d) Macaco hidropneumático.

Para geração de ar comprimido, foi selecionado um compressor Atlas Copco, modelo G4 150 FF TM 77L 440V YD com vazão nominal de 430 NL/min. De modo a atender os requisitos de disponibilidade de energia definidos pela norma IEEE 125 (2007) [14], foi selecionado um reservatório de ar comprimido 1.000 L de capacidade. Com isso, torna-se possível a abertura completa da válvula de adução e a operação do distribuidor sem a necessidade de operação do compressor, viabilizando operações de *blackstart*.

Para efetivação do projeto piloto, o sistema pneumático de automação e controle supracitado foi instalado na UG-AUX. Paralelamente, foram elaboradas atividades de restauração e reforma e reforma da unidade geradora, incluindo a reforma e substituição da vedação da válvula de adução, troca das buchas do distribuidor, reforma do sistema de resfriamento da turbina, limpeza da comporta e aquisição de um sistema integrado de regulação de tensão.

A seguir, serão apresentados os resultados de campo obtidos com o projeto piloto, com foco nas tarefas destinadas ao sistema pneumático de automação e controle da UG-AUX.

4.1 - Abertura e fechamento da válvula de adução

O acionamento da válvula de adução é realizado por um macaco hidropneumático controlado remotamente. Para abertura de válvula de adução, uma válvula pneumática 3/2 vias conecta as bombas pneumáticas com o reservatório de ar comprimido. Uma válvula reguladora de vazão permite controlar a velocidade de abertura do equipamento. Ao atingir a abertura completa, a válvula pneumática cessa o fornecimento de ar comprimido e o macaco hidropneumático irá manter a válvula de adução aberta durante a operação da unidade geradora. Testes em laboratório demonstraram que em 8 de horas de operação, houve uma retração de apenas 0,3 mm operando com carga máxima, sem nenhuma tendência de continuação deste comportamento, ou seja, o equipamento possui excelente estanqueidade e não são esperadas reposições devido à contínua ação do contrapeso sobre o macaco hidropneumático.

O fechamento da válvula de adução é realizado pela ação do contrapeso. Desta forma, a válvula hidráulica incorporada ao macaco hidropneumático conecta as câmaras A e B do macaco hidropneumático e uma válvula reguladora de vazão permite o ajuste da velocidade de fechamento.

Na Figura 4 são apresentados os dados de campo para uma operação de fechamento e abertura da válvula de adução. Ressalta-se que a medição de dados foi efetuada com a unidade geradora em operação, ou seja, à medida que a válvula foi abrindo, houve escoamento de água pela mesma. As unidades das variáveis são apresentadas em percentuais relativos ao seu valor nominal (PU).

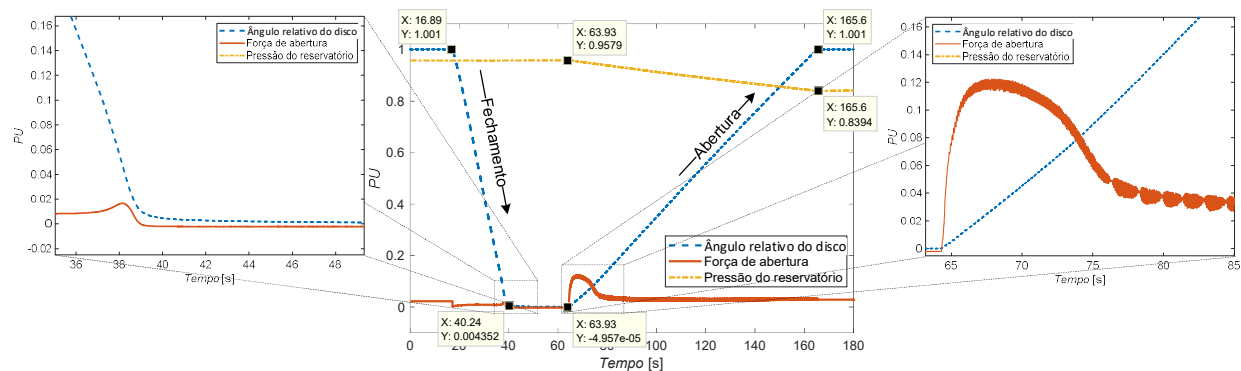


FIGURA 4 - Dados de campo relativos ao fechamento e abertura da válvula de adução.

Como pode ser visto, os tempos de fechamento e abertura foram 23,35 e 101,67 segundos, respectivamente. Como especificado pelo fabricante, o tempo de abertura deveria ser entre 80 e 160 segundos, desta forma, a solução atende ao requisito. Já para o tempo de fechamento, o fabricante não estabelece um valor e a norma ANSI/AWWA C504 sugere um tempo entre 70 e 140 segundos. Como não foi observado o efeito de golpe de aríete, assume-se que o tempo de fechamento foi adequado. Porém, ressalta-se que a velocidade de fechamento pode ser alterada por meio do ajuste da válvula reguladora de vazão existente no macaco hidropneumático.

A abertura da válvula de adução é a atividade que demanda a maior quantidade de ar comprimido para a automação e controle do grupo gerador. Porém, esta é uma atividade esporádica e pontual, sendo assim, o reservatório de ar comprimido foi projetado de modo que pudesse garantir a demanda de ar comprimido durante essa atividade, sem a necessidade de dimensionar o compressor para atender essa demanda pontual. Como pode ser visto, para abertura completa da válvula de adução a queda de pressão no reservatório foi de apenas 11,85% (de 9,579 a 8,394 bar). Desta forma, a pressão atua dentro da faixa normal de operação que é de 8 a 10 bar, evidenciando o correto dimensionamento do reservatório e do compressor.

Por meio da medição da pressão na câmara do macaco hidropneumático observa-se que o equipamento atingiu cerca de 12% de sua capacidade, ou seja, a força máxima de atuação da válvula de adução foi de 36,75 kN. Desta forma, conclui-se que o macaco hidropneumático pode ser aplicado para atuação de válvulas de adução dos mais variados portes, uma vez que, comercialmente, existem modelos que operam com até 980 kN.

4.2 - Abertura e fechamento do distribuidor

Para avaliação do tempo de abertura e fechamento do distribuidor foi realizado o teste em condição de água morta (sem água escoando pela turbina) de modo a possibilitar a total abertura do mesmo sem causar sobre velocidade no conjunto gerador. Os resultados são apresentados na Figura 5, onde pode ser visto que o tempo de abertura foi de 4,11 segundos e o tempo de fechamento foi de 5,66 segundos. Observa-se, também, o efeito do amortecimento de final de curso dos atuadores pneumáticos, que atua apenas no fechamento do distribuidor a partir da posição de 0,25 PU.

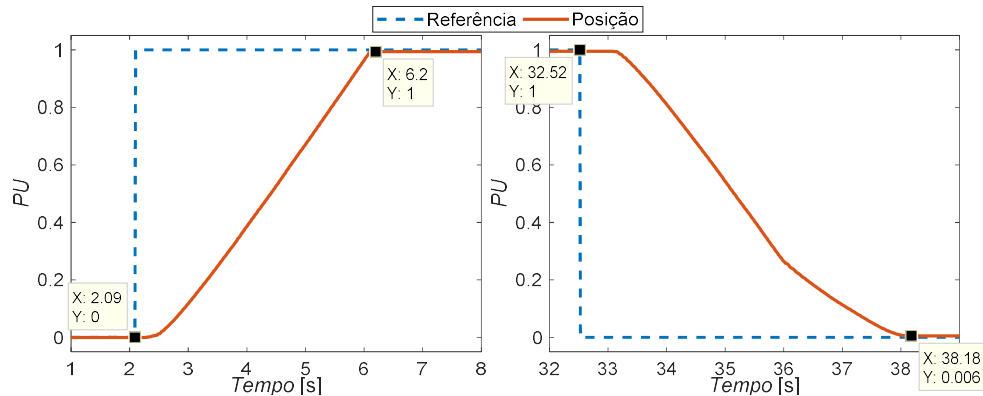


FIGURA 5 - Abertura (esquerda) e fechamento (direita) do distribuidor

De acordo com a recomendação do fabricante, o tempo de fechamento deve ser superior a 2,5 segundos, já o tempo de abertura deve ser maior que 5 segundos. Embora o tempo de abertura obtido foi marginalmente inferior ao recomendado, não foi observado o efeito de subpressão no conduto forçado, desta forma, os tempos de abertura e fechamento foram considerados aceitáveis.

4.3 - Regulação de velocidade

Na Figura 6 são apresentados os dados obtidos durante os testes de regulação de velocidade com a unidade geradora operando em rede isolada e em carga. Durante os testes, foi utilizado um banco de cargas com o valor nominal ajustado, primeiramente, em 22 kW (0,05 PU) e, em seguida, em 70 kW (0,16 PU). Como pode ser visto, o sistema de atuação pneumático é capaz de seguir os valores de referência de posição com excelente resposta dinâmica. Este comportamento se reflete na frequência do gerador, que em regime permanente apresentou oscilação entre 0,9953 a 1,005 PU (59,72 a 60,3 Hz), estando dentro do limite estabelecido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico [10], que recomenda uma variação de $\pm 0,5$ Hz.

Observa-se, também, que durante o transiente de carga de 22 kW para 70 kW, houve uma variação de velocidade de 3,47% (2,082 Hz) e o tempo para atingir frequência nominal foi, aproximadamente, 18 segundos. Nestes casos, o Operador Nacional do Sistema Elétrico recomenda um tempo máximo de 45 segundos para operação em frequências entre 57,5 e 58,5 Hz [10], demonstrando que a resposta dinâmica do sistema atende às recomendações do ONS.

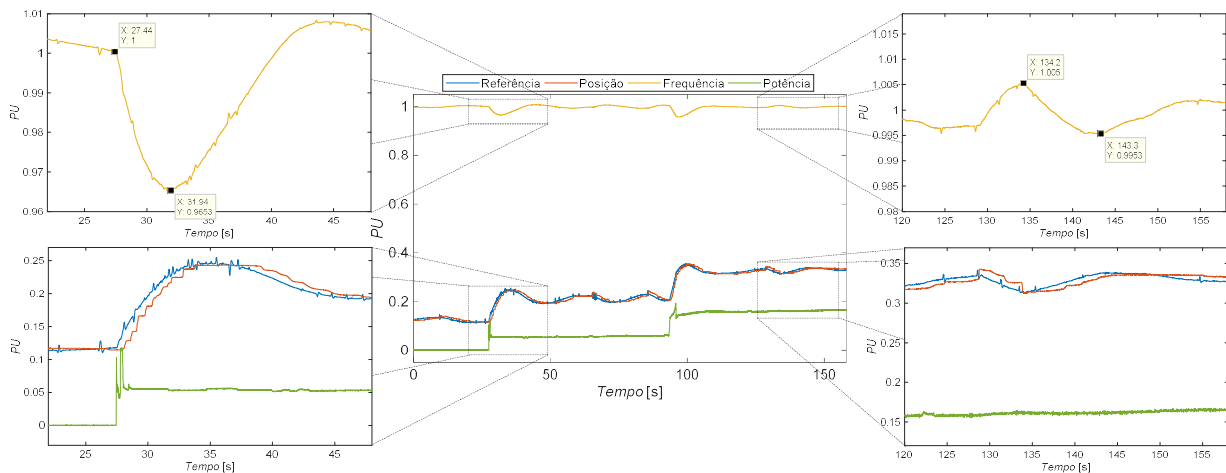


FIGURA 6 - Operação de regulação de velocidade com o sistema pneumático

A capacidade de regulação de velocidade do sistema pneumático também é demonstrada pela potência produzida pelo gerador, a qual se mantém constante durante a operação do grupo gerador. A leve tendência de alta na potência produzida pode estar relacionada com o aquecimento dos condutores elétricos até o banco de carga, demandando uma maior potência do gerador.

4.4 - Rejeição de carga

A resposta dinâmica do sistema pneumático também pode ser avaliada pelo teste de rejeição de carga (Figura 7), a qual foi realizada a partir de uma potência de 72 kW (0,1662 PU). Como pode ser visto, o sistema de controle foi capaz de responder adequadamente a essa perturbação, reduzindo a abertura do distribuidor de 0,33 PU para 0,12

PU, sendo esta última a abertura necessária para manter a frequência rotacional em seu valor nominal sem a presença de carga no gerador. Além disso, observa-se que a sobre velocidade atingida durante a operação foi de 1,058 PU, estando de acordo com a recomendação do fabricante, que estabelece um valor de referência de 1,3 PU para ativar o fechamento de emergência (*trip*).

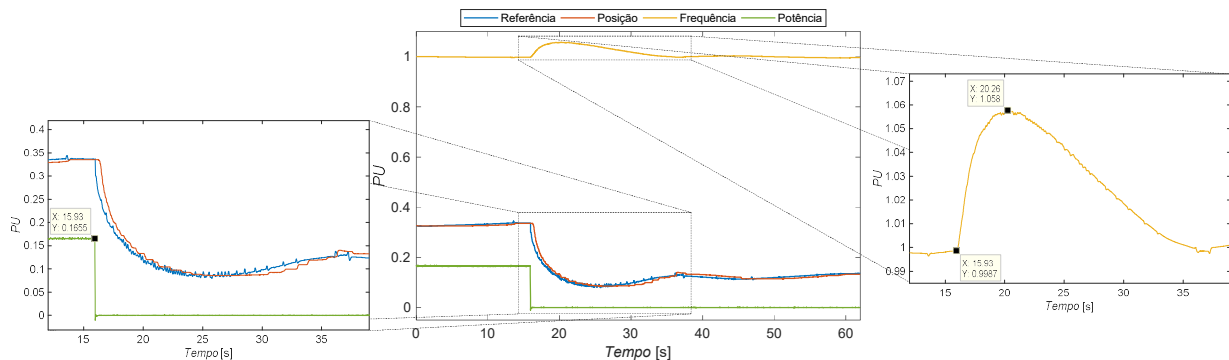


FIGURA 7 - Operação de rejeição de carga com o sistema pneumático

4.5 - Análise econômica

Durante o desenvolvimento deste projeto de pesquisa, foram desenvolvidas várias soluções tecnicamente viáveis, porém, o aspecto econômico foi um dos principais critérios para a escolha da melhor solução. Desta forma, um sistema hidráulico análogo para a aplicação do projeto piloto foi utilizado como referência para a análise econômica da solução proposta, a qual é apresentada na Tabela 1. Para o sistema hidráulico, foi considerada a solução tradicional, composta por válvulas proporcionais, válvulas discretas e atuadores lineares. A análise engloba o sistema de geração de potência, armazenamento, condicionamento de fluido, e também os sistemas de atuação do distribuidor, da válvula de adução e do freio da unidade geradora.

TABELA 1 – Comparação de custos relativos entre a solução hidráulica e pneumática

Componentes	Custo relativo hidráulico (%)	Custo relativo pneumático (%)
Geração de potência, armazenamento e condicionamento de fluido e válvulas direcionais	60.17%	30.02%
Válvulas proporcionais	22.84%	20,77%
Óleo hidráulico ISO VG 68 (140 l)	1.79%	0.00%
Atuadores (Regulador de velocidade)	2.93%	2.47%
Atuadores e válvulas de controle (Sistema de freio)	4.14%	1.75%
Atuadores e válvulas de controle (Válvula de adução)	8.11%	15.62%
Custo total	100.00%	70,63%

No aspecto econômico, a maior vantagem do sistema pneumático está relacionada com a geração e armazenamento de ar comprimido, uma vez que o custo com compressor e reservatório se mostrou consideravelmente menor em relação à uma unidade de potência hidráulica. Ressalta-se que a facilidade de armazenamento de elevadas quantidades de energia por meio do reservatório de ar comprimido possibilita que operações de *blackstart* sejam efetuadas. Outro aspecto evidenciado na Tabela 1 é a ausência de óleo hidráulico para os sistemas pneumáticos, que além de favorecer à redução do uso de produtos derivados do petróleo, contribui para a redução do custo de aquisição da solução pneumática, a qual se mostrou ser cerca de 30% mais econômica do que a solução tradicional. Além disso, estudos e testes estão sendo realizados com o objetivo de substituir as válvulas proporcionais pneumáticas por válvulas proporcionais reguladoras de pressão, as quais vem apresentando satisfatório desempenho dinâmico e possibilita uma redução total de 45% do custo de aquisição da solução pneumática.

A Tabela 1 não considera os custos com tubulações em ambas as soluções, porém, a tubulação rígida que é utilizada em sistemas hidráulicos é, aproximadamente, 100% mais cara do que a tubulação PPR utilizada para aplicações pneumáticas, além de possuir uma instalação mais complexa e demorada, evidenciando a viabilidade econômica da solução pneumática.

5.0 - CONCLUSÃO

Neste informe técnico foi apresentada uma nova solução para a automação e controle de turbinas hidráulicas, a qual é baseada em tecnologia pneumática e tem como objetivo substituir os sistemas hidráulicos convencionais que

são tradicionalmente utilizados para estas atividades. O regulador de velocidade é controlado por dois atuadores pneumáticos lineares e duas válvulas proporcionais reguladoras de vazão. A atuação da válvula de adução é feita por um macaco hidropneumático, desenvolvido especificamente para esta aplicação, possuindo capacidades de controle remoto e fechamento de emergência.

Após a identificação dos requisitos de projeto, as soluções propostas foram avaliadas por meio de simulações dinâmicas e testes em laboratório, por meio dos quais foi possível constatar a capacidade do sistema proposto em atender aos requisitos da aplicação. Com isso, foi dado início ao desenvolvimento do projeto piloto, aonde foi desenvolvido um sistema puramente pneumático para a automação e controle da Unidade de Geração Auxiliar da Usina Hidrelétrica de Salto Grande - SP.

Os testes em campo comprovaram a capacidade da tecnologia pneumática para controlar e automatizar o conjunto gerador, sendo capaz de realizar com sucesso as operações de abertura, fechamento, regulação de velocidade e rejeição de carga do distribuidor, e também, abertura e fechamento da válvula de adução. Além disso, a solução pneumática se mostrou economicamente viável, com custos de aquisição 30% menores em relação ao equivalente hidráulico.

Além da viabilidade econômica, a tecnologia desenvolvida promove a redução do uso de produtos fósseis e reduz o risco de contaminação do leito do rio, contribuindo com a constante demanda da sociedade por energias limpas, além de ir de encontro à tendência atual de desenvolvimento de pequenas centrais hidrelétricas como alternativa para reduzir os impactos ambientais.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL. "Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA". Disponível em: www.aneel.gov.br/siga (Acessado em 30/03/2021)
- [2] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). "Data and Statistics". Disponível em: www.irena.org/statistics (Acessado em 30/03/2021)
- [3] NAUTIYAL, H., e GOEL, V. "Sustainability assessment of hydropower projects". Journal of Cleaner Production Vol. 265; 2020, pp. 121661.
- [4] NETWORK FOR ALTERNATIVE TECHNOLOGY AND TECHNOLOGY ASSESSMENT. "NATTA's journal Renew, n. 153, jan-fev 2005". Disponível em: <http://eeru.open.ac.uk/> (Acessado em 30/03/2021)
- [5] BOLLMANN, A. "Fundamentos da Automação Industrial Pneumática - Projeto de Comandos Binários Eletropneumáticos". ABHP, São Paulo, Brazil, 1997.
- [6] LOCATELI, C. C., DE NEGRI, V. J., e DE PIERI, E. R. "A servo-pneumatic positioning system driven by fast switching on/off valves". Proceedings of the Dynamic Systems and Control Conference: pp. 303-310, 2011.
- [7] ENDLER, L., DE NEGRI, V. J., e CASTELAN, E. B. "Compressed air saving in symmetrical and asymmetrical pneumatic positioning systems". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering Vol. 229, No. 10; 2015, pp. 957-969.
- [8] CONTERATO, G. P., SPADA, T. A. B., VIGOLO, V., WEISS, L. A., LEONCINI, L. L., ARAUJO, P. d., e NEGRI, V. J. D. "Modeling a pneumatic speed governor using electronic pressure valves and directional valves". Proceedings of the 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Uberlândia, MG, Brazil, 2019.
- [9] SPADA, T. A. B., CONTERATO, G. P., VIGOLO, V., WEISS, L. A., LEONCINI, L. L., KLITA, R. H., ARAUJO, P. d., e DE NEGRI, V. J. "Modelling a hydro-pneumatic system to actuate a turbine inlet butterfly valve". Proceedings of the 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Uberlândia, MG, Brasil, 2019.
- [10] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, "Submódulo 25.6: Indicadores de qualidade de energia elétrica – frequência e tensão". 2009.
- [11] ANSI/AWWA, "ANSI/AWWA - C504-15: Rubber- Seated Butterfly Valves". America Water Works Association, EUA, 2015.
- [12] SPADA, T. A. B. "Desenvolvimento Teórico-Experimental de Um Sistema Para o Acionamento de Válvulas de Adução em PCHs Baseado em Tecnologia Pneumática". Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2020.
- [13] VIGOLO, V., CONTERATO, G., SPADA, T., WEISS, L., e DE NEGRI, V. "Energy Efficiency and performance of servopneumatic drives for speed governors based on operating points". Proceedings of the 12th International Fluid Power Conference: pp. 59-68, Dresden, Germany, October 12-14, 2020.
- [14] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, "IEEE 125: Recommended Practice for Preparation of Equipment Specifications for Speed-Governing of Hydraulic Turbines Intended to Drive Electric Generators". Nova York, EUA, 2007.

DADOS BIOGRÁFICOS



Vinícius Vigolo concluiu seu mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2018. Atuou como engenheiro pesquisador na mesma universidade durante 3 anos e atualmente realiza sua pesquisa de doutorado no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP-UFSC), cujo foco é o desenvolvimento de um método de dimensionamento para sistemas de atuação pneumáticos com base no desempenho dinâmico e eficiência energética. Suas áreas de interesse incluem projeto e controle de sistemas hidráulicos e pneumáticos, simulação de sistemas dinâmicos e projeto de sistemas mecatrônicos.

(2) GREGORI PICOLOTTO CONTERATO

G. P. Conterato é engenheiro mecânico formado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) desde 2017. Atualmente é aluno do programa de pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e trabalha no projeto de pesquisa e desenvolvimento que visa desenvolver uma solução pneumática para automação e controle de turbinas hidrelétricas no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos (LASHIP). Suas áreas de interesse são: sistemas de controle hidráulicos e pneumáticos, sistemas de posicionamento, geração de energia e eficiência energética.

(3) TALLES AUGUSTO BRAGAGNOLO SPADA

Mestre em engenharia mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2020), atualmente atuando como engenheiro de manutenção na empresa BRF. Tem como áreas de interesse sistemas hidráulicos e pneumáticos, sistemas de automação, PCM e técnicas de manutenção.

(4) LEONARDO AUGUSTO WEISS

L. A. Weiss received his degree in Automation and Control Engineering from the Federal University of Santa Catarina (UFSC) in 2004. He has an MBA in Project Management, received by Getulio Vargas Foundation (FGV) in 2011 and he is currently working as a Research and Development Coordinator at the company Reivax Automation and Control S/A. His areas of interest include industrial instrumentation, power systems, and SCADA systems programming.

(5) PEDRO GAYER DE ARAUJO

Engenheiro eletricitista graduado pela UFF - Universidade Federal Fluminense e com formação em Gestão de Projetos pela FIA - Fundação Instituto de Administração, atua com o programa de Pesquisa & Desenvolvimento regulado pela ANEEL desde 2016. Atualmente trabalha na área de P&D I da CTG Brasil, multinacional que opera no Brasil focado 100% em geração de energia limpa.

(6) VICTOR JULIANO DE NEGRI

Víctor J. De Negri é professor titular na Universidade Federal de Santa Catarina, Coordenador do Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos – LASHIP do Departamento de Engenharia Mecânica. Graduado em Engenharia Mecânica pela UNISINOS (1983), com mestrado (1987) e doutorado (1996) em Engenharia Mecânica na área de hidráulica e pneumática pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Em 2010 esteve em pós-doutorado no PTMC - University of Bath, Inglaterra. As áreas de interesse incluem: análise e projeto de componentes e sistemas hidráulicos e pneumáticos e Metodologia de projeto para automação e controle de equipamentos e processos.

(7) LEONARDO LEONCINI

Leonardo Lino Leoncini graduado em Engenharia Elétrica pelo Instituto Tecnológico do Sudoeste de São Paulo (INTESP) em 2006. MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getulio Vargas (FGV), MBA em Gestão de Energias Renováveis pela Universidade Estácio de Sá, Trabalho atual na China Three Gorges Brasil como Especialista em Engenharia Elétrica. Áreas de interesse: Sistemas elétricos de potência, Geração de energia, Gerenciamento de Projetos, Gerenciamento de Manutenção e Sistemas de Automação e Controle sem fio.