

ENSAIO DE POSICIONAMENTO DO DISTRIBUIDOR DE UMA TURBINA FRANCIS EM ÁGUA MORTA

Luís Guilherme Savaris¹; Victor Henrique Pedraci¹; João Borges da Silveira^{2,5}; Gisele Aparecida de Souza^{3,5}; Mariana Costa Falcão^{4,5*}

¹ Graduando em Engenharia Elétrica, Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS; ² Doutor em Ciência dos Materiais – FEIS/UNESP; ³ Doutora em Ciência dos Materiais – FEIS/UNESP; ⁴ Mestre em Engenharia Elétrica – UNESP; ⁵ Docente das Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS
* autor correspondente: profmarianafalcao@gmail.com

RESUMO

O ensaio de posicionamento do distribuidor de uma turbina do tipo Francis em água morta, busca através dos resultados obtidos, realizar ajustes na malha de controle do regulador de velocidade, melhorando a precisão no controle da velocidade / frequência e potência de uma unidade geradora de eletricidade. Estes ajustes são realizados diretamente nos ganhos dos componentes do regulador de velocidade, sendo eles: válvula proporcional, válvula distribuidora e distribuidor. Obtêm-se os tempos de respostas de abertura e fechamento do distribuidor através do ensaio em estudo, podendo compará-los aos tempos calculados de projeto, onde caso seja necessário, poderá ser feito o ajuste da malha de controle do regulador de velocidade, utilizando o método do ponto crítico com cálculos de Ziegler e Nichols. A precisão do ajuste de uma malha de controle do regulador de velocidade de uma unidade geradora, é de extrema importância para a eletricidade gerada no sistema elétrico, evitando e corrigindo rapidamente variações indesejadas, de maneira a não prejudicar o usuário final, podendo paralisar processos fabris e residenciais. Para este estudo, realizou-se o ensaio de posicionamento do distribuidor na unidade geradora 05 da UHE Ilha Solteira, onde através dos resultados obtidos, observou-se ajustes precisos na fase de comissionamento de tal unidade geradora, não necessitando realizar ajustes. Contudo, buscou-se desde o início deste trabalho, padronizar o método de ensaio, deixando dessa forma uma contribuição para a estabilidade do sistema elétrico brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE: regulador de velocidade; malha de controle; turbina Francis; distribuidor; válvula distribuidora; válvula proporcional.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil convive com uma das piores crises energéticas de sua história, logo torna-se importante o controle das cargas ligadas ao Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN). O controle volumoso de todo o SIN é realizado pelas usinas hidrelétricas de grandes portes, onde em sua maioria a

principal fonte geradora é através da turbina Francis (VOITH, 2015).

A turbina Francis recebe o nome do engenheiro inglês James Bicheno Francis, nascido em 1812, que a idealizou em meados de 1849. O primeiro exemplar foi fabricado em 1873 pela empresa J.M. Voith, que aperfeiçoou o projeto original com a utilização de palhetas diretrizes móveis, para o controle da turbina

(VOITH, 2015). Este tipo de turbina é largamente aplicado pelo fato das suas características cobrirem um grande campo de rotação específica. No passado, o rendimento destas máquinas era inferior a 85%, no entanto, hoje ultrapassam a 92% (JUNIOR, 2000).

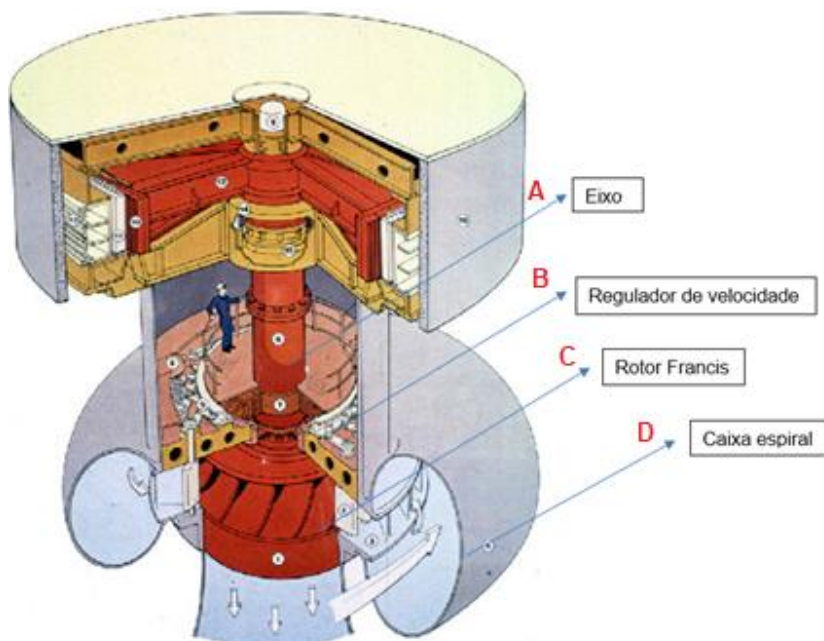
Os principais elementos da turbina Francis são caixa espiral, pré-distribuidor, distribuidor, regulador de velocidade, rotor, eixo e tubo de sucção.

O conjunto caixa espiral (Figura 1D) e pré-distribuidor (Figura 1B) tem como finalidade guiar o fluido para a

entrada do rotor e aumentar sua velocidade de acordo com a redução do volume dos gomos da caixa. Geralmente, é fabricada com chapas de aço carbono soldadas em gomos. A caixa espiral liga-se ao conduto forçado na seção de entrada e ao pré-distribuidor na seção de saída (ALVES, 2007).

O regulador de velocidade (Figura 1) controla a potência ativa, notadamente quando o grupo gerador está operando em paralelo com a rede ou com outra máquina (SOUZA, 2009).

Figura 1. Conjunto caixa espiral, regulador de velocidade (controle do distribuidor), eixo e rotor.



Fonte: Extraído de Quitela, 2007.

Os reguladores automáticos de velocidade, geralmente empregados nas usinas hidrelétricas são do tipo mecânico, constituídos por um servomecanismo acionado por óleo pressurizado (ELETROBRÁS; DNAEE, 1985).

Qualquer variação de rotação do grupo gerador coloca em funcionamento o servomecanismo de acionamento do distribuidor da turbina. O distribuidor dispõe o fluxo de água por meio da turbina e controla a sua variação de potência, conforme a variação da carga na unidade geradora (ALVES, 2007).

O eixo (Figura 1A) é o componente que transfere para o gerador, parte da quantidade de movimento gerada pelo fluido ao passar pelo rotor.

O rotor (Figura 1C) é um elemento de grande importância para uma turbina hidráulica, pois ele proporciona a conversão de energia hidráulica em potência de eixo que é transmitida ao gerador.

No SIN, a eletricidade gerada deve ter frequência nominal padrão de 60 Hertz (Hz), uma vez que todas as cargas brasileiras trabalham neste padrão. A frequência elétrica de saída do gerador

de uma usina em função de sua velocidade de trabalho é calculada pela Equação 1 (CORSICO; ARAUJO, 2013; LEI 4.454/6 de novembro de 1964).

$$f = \frac{n * p}{120} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

f = Frequência elétrica proporcionada pela rotação do eixo [Hz];

n = Velocidade de rotação [RPM];

p = Quantidade de polos do gerador.

O regulador de velocidade da turbina, dividido nas partes eletrônica de controle e hidráulica de potência, tem como principal objetivo manter constante a relação velocidade / frequência da unidade geradora. A parte eletrônica de controle é responsável por executar os comandos e enviá-los para a parte hidráulica de potência. Esta recebe os comandos elétricos e executa as ações hidráulicas por meio de óleo mineral acumulado em uma central, denominada acumulador (COMISSÃO ELETROTÉCNICA INTERNACIONAL – IEC, guia 61362, 2012).

A abertura ou fechamento do mecanismo distribuidor da turbina, define o número de rotações por minuto da unidade geradora, uma vez que esse movimento de abertura e / ou fechamento do mecanismo, permite ou impede, respectivamente, a passagem de mais ou menos água para movimentação da turbina (IEC 61362, 2012).

A regulação de velocidade/frequência do rotor é realizada conforme a Figura 2, onde inicialmente o óleo pressurizado em alta pressão (Figura 2B) se encontra no acumulador do regulador de velocidade hidráulico, sendo direcionado à entrada da válvula direcional proporcional (Figura 2E) e a duas das três entradas da válvula distribuidora (Figura 2H). A válvula direcional proporcional recebe um sinal elétrico de comando do regulador de velocidade eletrônico (Figura 2A) e o converte em uma abertura (vazão)

para passagem do óleo sob pressão do acumulador, com direção e magnitude proporcional ao sinal elétrico de entrada. Essa válvula é considerada a conexão entre a parte de controle e a parte hidráulica de potência de um regulador de velocidade. Devido à grande força necessária para mover o mecanismo do distribuidor da turbina, são necessárias duas etapas de amplificação hidráulica. Assim, a vazão proveniente da válvula direcional proporcional posiciona o êmbolo da válvula distribuidora. Antes do óleo pressurizado chegar à válvula direcional proporcional, ele passa por um sistema de filtragem para retirada de impurezas; posteriormente é direcionado à válvula de retenção do respectivo filtro em operação, impedindo que o óleo vá para o filtro de retaguarda, dispondo assim de um sistema de redundância, caso um dos filtros venha a ser danificado (REIVAX, 2018).

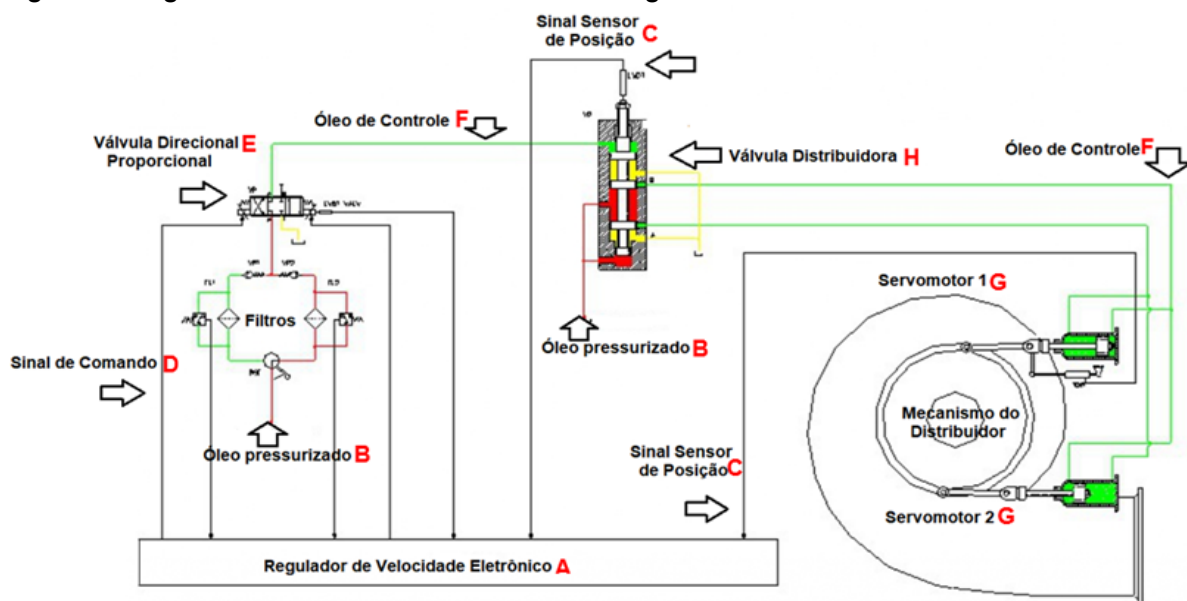
A principal função da válvula distribuidora é a de amplificação hidráulica com capacidade para controle dos dois servomotores presentes na unidade geradora, sendo que estes são os dispositivos finais que controlam a abertura e o fechamento das pás móveis do mecanismo do distribuidor, para que ocorra a passagem de mais ou menos água por ele, controlando assim, a velocidade / frequência que a unidade geradora deve operar. As lógicas por diferença de área (entrada e saída de óleo) na válvula distribuidora, são resultantes do óleo enviado pela válvula direcional proporcional e o óleo sob pressão do acumulador, sendo que se a válvula direcional proporcional permitir a passagem de óleo, ocorrerá a abertura das pás móveis do mecanismo do distribuidor, proporcionalmente à vazão de óleo permitida. Já se a válvula direcional proporcional estiver sendo direcionada para fechamento, ou seja, impedindo a passagem do óleo que controla a válvula distribuidora, o óleo sob pressão, atuará diretamente em duas das três entradas da válvula

distribuidora, ocasionando o fechamento das pás móveis do mecanismo do distribuidor, também proporcional à vazão de óleo permitida. Dessa forma, a válvula distribuidora só efetuará o controle de abertura e fechamento das pás móveis do mecanismo do distribuidor, através de sua atuação direta por vazão de óleo nos dois servomotores. A válvula direcional proporcional, a válvula distribuidora e os servomotores, possuem sensores que através de seus posicionamentos momentâneos, indicam ao regulador de velocidade eletrônico em que proporção e condições estão atuando, podendo assim efetuar o controle da abertura ou fechamento das pás móveis do mecanismo, tendo como consequência o

controle da velocidade / frequência da unidade geradora de acordo com o estipulado em comissionamento (INSTITUTO DE ENGENHEIROS ELETRICISTAS E ELETRÔNICOS – IEEE, padrão 1207, 2011).

Uma das principais razões para realizar a análise do funcionamento do regulador de velocidade, é que se pode verificar a importância da sua correta operacionalidade, onde através de uma malha de controle, que se encontra no regulador de velocidade eletrônico, busca-se a certa resposta de posicionamento do mecanismo do distribuidor, em função da frequência da energia elétrica que será gerada (KUNDUR, 1994).

Figura 2. Diagrama básico de funcionamento do regulador de velocidade.



Fonte: Elaborado pelos autores.

De forma simplificada, no ensaio de posicionamento do mecanismo do distribuidor da turbina Francis em água morta, ou seja, sem a presença de água nas pás móveis do mecanismo, pode-se verificar a operacionalidade da malha de controle do regulador de velocidade, observando itens importantíssimos para o controle, como tempo de resposta e o correto posicionamento do mecanismo de acordo com o sinal enviado, em que caso as respostas não sejam

satisfatórias, é necessário realizar ajustes na malha de controle do regulador de velocidade eletrônico (REIVAX, 2018).

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é padronizar o método de ensaio de posicionamento do distribuidor de uma turbina Francis em água morta, de modo que os tempos de respostas da malha de controle do regulador de velocidade sejam

considerados ágeis segundo o padrão de controle e regulação.

Figura 3. Componentes do regulador de velocidade hidráulico. A. Servomotor e mecanismo distribuidor. B. Sistema hidráulico do regulador de velocidade. C. Eletroválvula de isolamento (S20Q). D. Eletroválvula de isolamento com dispositivo de bloqueio aplicado. E. Eletroválvula trava servomotor (S65). F. Trava do servomotor desaplicada. G. Transdução de UG parada.



Fonte: Elaborado pelos autores (fotografias).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Condições preliminares para a realização do ensaio do posicionamento do mecanismo distribuidor da turbina Francis

A unidade geradora 05 da UHE Ilha Solteira dispõe de um regulador de tensão e velocidade integrado (Reivax), para controle de sua velocidade/frequência. O regulador integrado de tensão e velocidade apresenta uma interface homem-máquina (IHM), na qual se pode gerar comandos de abertura e fechamento do distribuidor, bem como a atuação na sua malha de controle.

O ensaio de posicionamento do mecanismo distribuidor de turbina Francis utiliza o princípio de água morta, ou seja, o posicionamento do distribuidor é comandado sem a passagem de água pela caixa espiral, comporta de emergência fechada e freios do gerador aplicados para impedir o giro acidental do gerador. O sucesso e segurança do ensaio e dos trabalhadores está vinculado a alguns passos preliminares, tais como, (i) evacuação da área próxima ao mecanismo distribuidor, permanecendo no local apenas técnicos estritamente necessários para avaliação, devidamente instruídos e munidos de rádios de comunicação para tratativas com o técnico responsável pelo ensaio (Figura 3A); (ii) todos os pressostatos e transmissores de pressão do regulador de velocidade operacionais; (iii) sistema hidráulico do regulador de velocidade pressurizado (Figura 3B) de acordo com o projeto; (iv) motobombas 1 e 2 do regulador de velocidade hidráulico operacionais; (v) regulador de tensão e velocidade integrado em comando local; (vi) correta fixação e limpeza dos transdutores de posição da válvula distribuidora e do distribuidor; (vii) pressurização da eletroválvula de isolamento (Figura 3C) do óleo que comanda o distribuidor (posição aberta acionada mecanicamente por dispositivo apropriado) (Figura 3D); (viii)

eletroválvula responsável pela (des)aplicação da trava mecânica do servomotor na posição aberta pelo dispositivo apropriado (Figura 3E); (ix) confirmação visual do levantamento da trava mecânica do servomotor (Figura 3F) e (x) verificação da transdução de posição na IHM do regulador (Figura 3G), considerando UG parada (válvula fechadas). A Figura 3 (A-F) apresenta todos os componentes do regulador de velocidade hidráulico que devem ser controladas e a Figura 3G, as transduções de UG parada.

Após os passos preliminares descritos acima, utilizou-se os softwares Reivax (i) SEC (Sistema de Edição de Configurações) para o download das curvas obtidas do ensaio em campo e (ii) SVC (Sistema de Visualização de Curvas) para a análise das curvas.

3.2 Ensaio do posicionamento do mecanismo distribuidor da turbina Francis na unidade geradora 05 da usina hidroelétrica (UHE) Ilha Solteira

O ensaio de posicionamento foi padronizado para abertura e fechamento dos extremos do distribuidor, uma vez que o objetivo de análise, foi de coletar respostas em situações críticas, como fechamento total do distribuidor devido a uma parada forçada da UG em caso de atuação de proteção.

Para o início do ensaio, acessou-se o bloco “Saída de Controle” do RV na IHM do RTVX (Figura 4A), para comandar a válvula proporcional, tendo como consequência, a movimentação da válvula distribuidora e do distribuidor. Para mover o distribuidor do fechamento mínimo à abertura máxima com saturação da válvula proporcional, ajustou-se o valor do sinal de repouso normalmente 4 mA para o estado fechado (seta indicativa na Figura 4B) para 20,0 mA.

Após a normalização da pressão do óleo para valores de projeto, manobrou-se de abertura total do distribuidor para fechamento mínimo com saturação da válvula proporcional, ajustou-se o

valor do sinal de repouso para 4 mA.

Figura 4. Interface Homem Máquina regulador de velocidade. A. Bloco “Saída de Controle”. B. Comando da válvula proporcional.



Fonte: Elaborado pelos autores (captura de tela).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados, com a utilização do *software* SVC, teve início com a plotagem das curvas de abertura (Figura 5) e fechamento (Figura 6) da válvula proporcional, válvula distribuidora e distribuidor, de modo a comparar os tempos de respostas, com os tempos de projeto e padrões de regulação. Assim, concluindo se haveria necessidade ou não, de ajuste da malha de controle do RV.

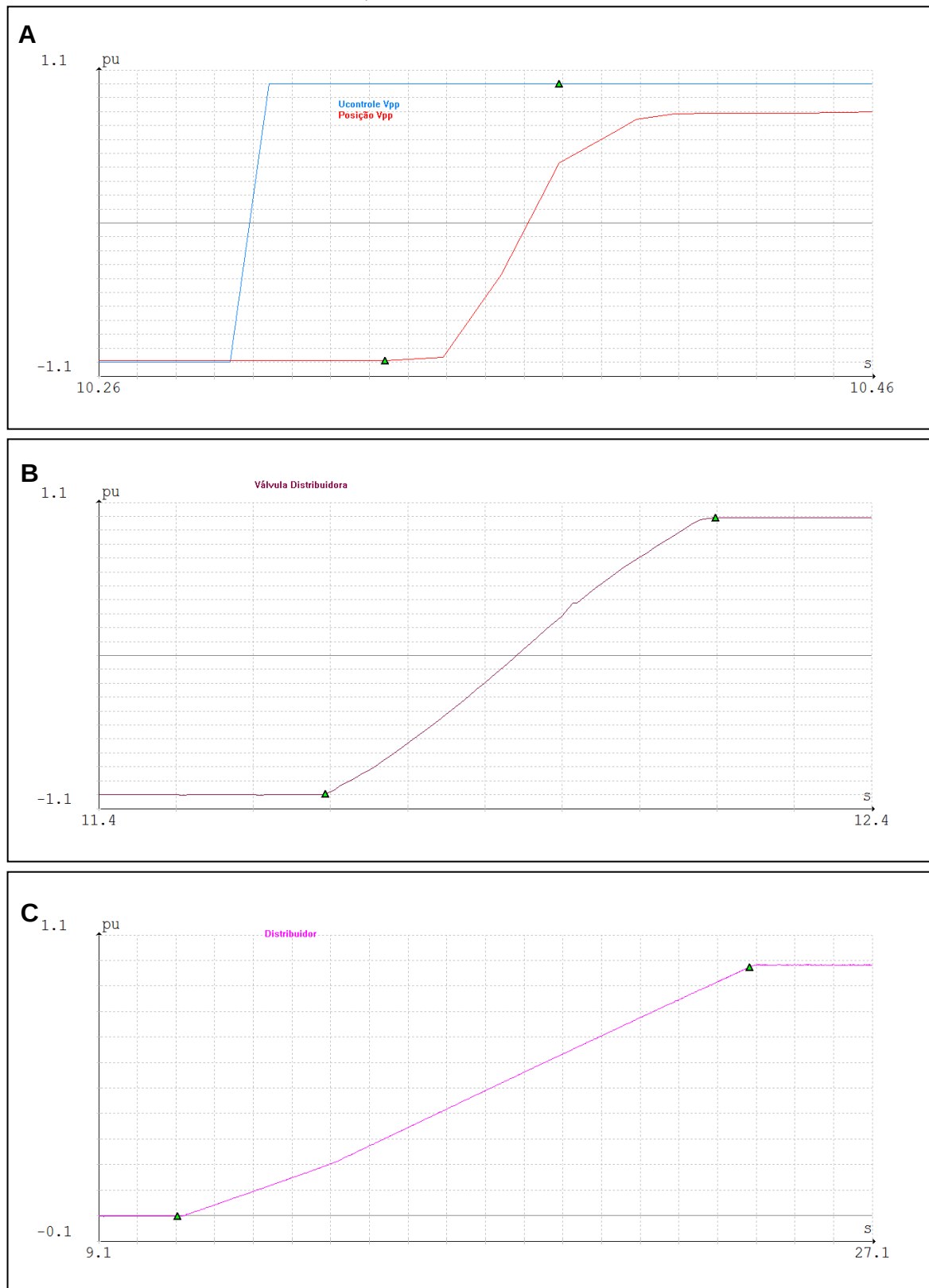
Após análise das curvas de abertura e fechamento dos extremos do

distribuidor, verificou-se que os tempos de resposta da válvula proporcional, válvula distribuidora e distribuidor se encontram dentro dos valores de projeto, não sendo necessário realizar ajustes nas malhas de controle de tais componentes.

Caso o resultado do ensaio apresentasse divergências e tempos de resposta diferentes dos projetados, aconselha-se realizar o ensaio de posicionamento separadamente em cada componente, sendo estes, a válvula proporcional, válvula distribuidora e distribuidor, uma vez que cada um destes apresenta

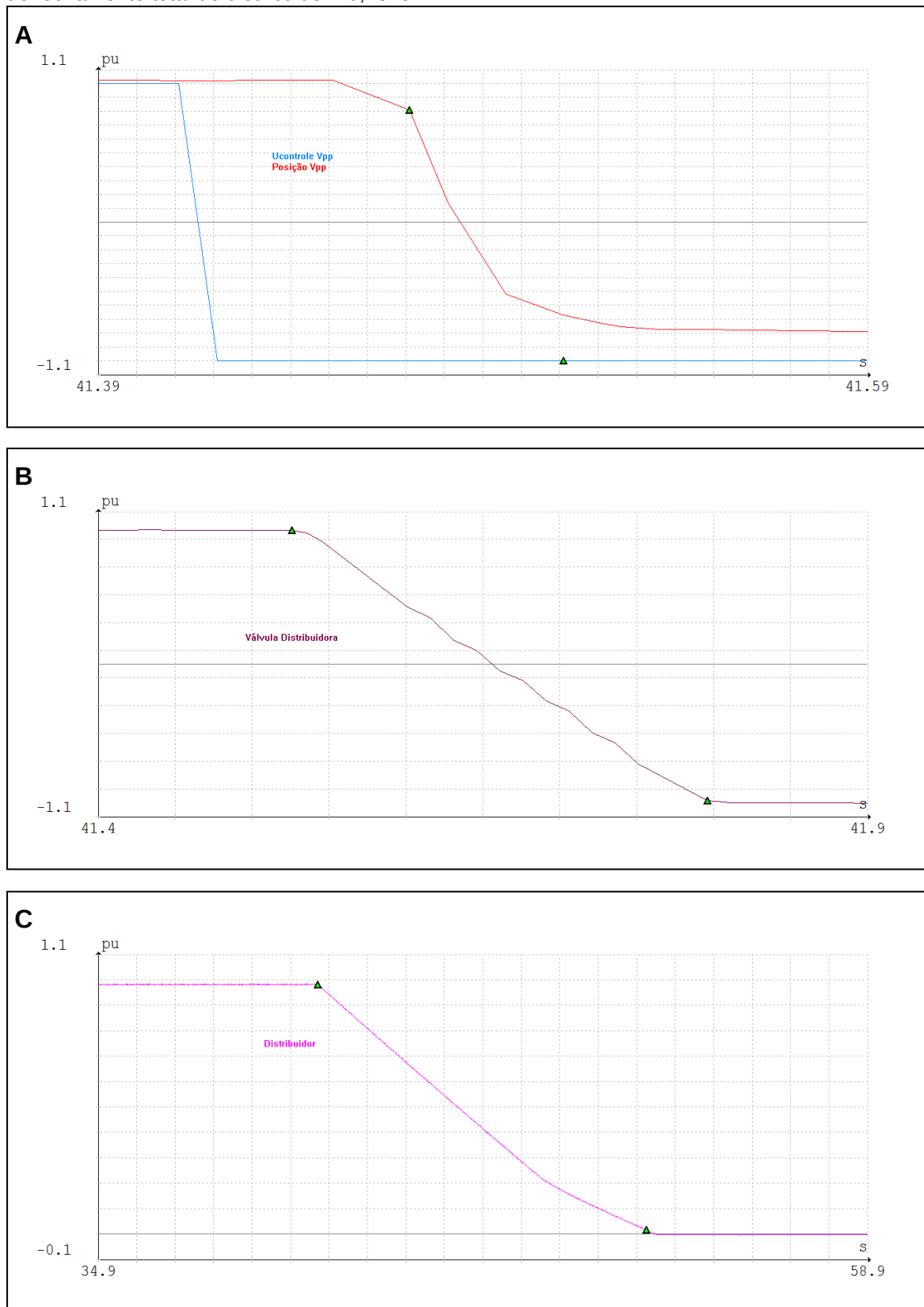
uma malha de controle, sendo possível variar seus ganhos.

Figura 5. Curvas de abertura obtidas no ensaio. A. Comando de abertura máxima da válvula proporcional 0,045s. B. Comando de abertura máxima da válvula distribuidora 0,4034s. C. Comando de abertura máxima do distribuidor 13,32s.



Fonte: Elaborado pelos autores (captura de tela).

Figura 6. Curvas de fechamento obtidas no ensaio. A. Comando de fechamento total da válvula proporcional 0,0402s. B. Comando de fechamento total da válvula distribuidora 0,27s. C. Comando de fechamento total do distribuidor 10,252s.



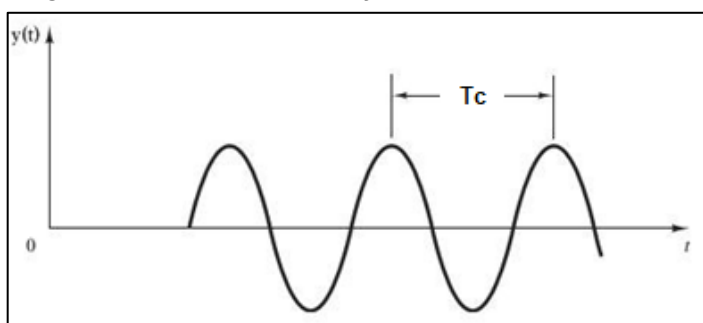
Fonte: Elaborado pelos autores (captura de tela).

As malhas de controle do regulador de velocidade em estudo, apresentam ganhos proporcionais, integrais e derivativos (PID), onde utiliza-se o método do ponto crítico (Figura 7) para o ajuste inicial de delas.

Essas malhas operam em regime fechado. Inicialmente, varia-se somente o controle proporcional, aumentado progressivo e lentamente, até que certa altura o sistema passa a apresentar uma oscilação sustentada (Figura 7). O

mínimo valor do ganho do controlador proporcional para o qual essa oscilação surge é chamado ganho crítico do processo (K_c) e o período da oscilação observada é dito o período crítico do processo (T_c). Assim, os ajustes de um PID para o processo podem ser feitos em função dessas características, aplicando fórmulas que relacionam os parâmetros do PID com os valores obtidos para estas grandezas.

Figura 7. Período de oscilação sustentada T_c



Fonte: Extraído de Bazanella e Silva Jr, 2006.

A fase de modelagem, resume-se a consultar as tabelas correspondentes. O

Quadro 1 apresenta as fórmulas originalmente propostas por Ziegler e Nichols.

Quadro 1. Fórmulas de Ziegler e Nichols para ajuste pelo método do ponto crítico.

Tipo de controlador	K	T_i	T_d
P	$0,5K_c$	—	—
PI	$0,4K_c$	$0,8T_c$	—
PID	$0,6K_c$	$0,5T_c$	$0,125T_c$

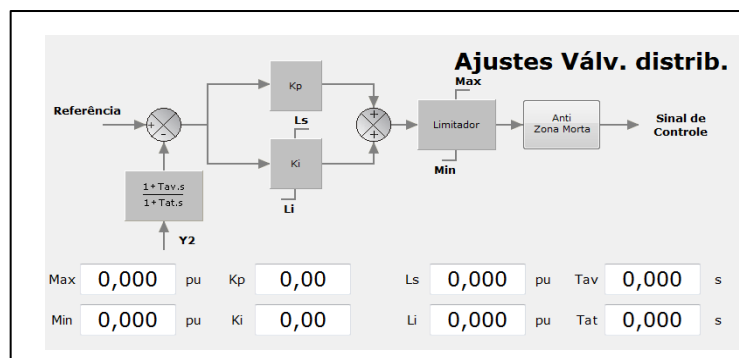
Fonte: Extraído de Bazanella e Silva Jr, 2006.

Na prática, por se tratar de equipamentos mecânicos que podem apresentar desgaste e pequenos vazamentos, pode-se partindo do ajuste inicial, variar os ganhos da malha PID, onde para uma melhor resposta em regime transitório, o aumento do ganho proporcional é indicado. Já para uma melhor resposta em regime permanente o aumento do ganho integral é indicado. No entanto se desejar melhorar a

estabilidade do sistema, antecipando o erro para melhorar o tempo de resposta, o aumento do ganho derivativo é indicado, porém com muito cuidado, pois pode exigir muito da malha de controle, por se tratar de atuação em equipamentos mecânicos. Então o ensaio é repetido até que os tempos de resposta das válvulas proporcional e distribuidora, bem como do distribuidor se enquadrem nos tempos de projeto.

Figura 8. Malhas de controle do RV. A. Válvula proporcional. B. Válvula distribuidora. C. Distribuidor

A



B

Ajuste da Saída de Controle

Sinal de Controle: 0,0000 pu

Ganho: 0,000 pu

Offset: 0,000 pu

Bloqueio: 0,000 mA

Sinal em Repouso: 0,000 mA

Saída: 0,000 mA

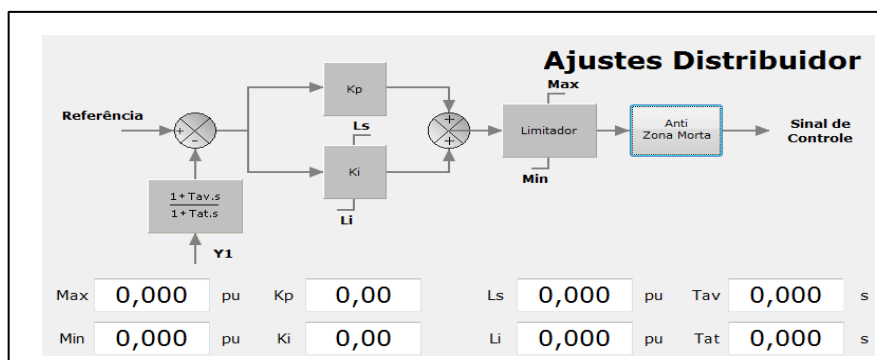
Dither

Kdither: 0,000 pu

Fdither: 0,0 Hz

A frequência do sinal Dither é única para as saídas de controle 1, 2 e 3

C



Fonte: Elaborado pelos autores (captura de tela).

5 CONCLUSÕES

Atualmente, todos os processos fabris e residenciais são dependentes da energia elétrica, logo a falta ou má qualidade da eletricidade pode gerar transtornos econômicos e pessoais. Assim, a constância de 60Hz da frequência da eletricidade é extremamente importante para o SIN, portanto o ajuste preciso da malha de controle de velocidade de uma UG, é fundamental para manter os padrões da energia elétrica brasileira estáveis. Podendo-se então, evitar e corrigir rapidamente perturbações no sistema,

de modo que o usuário não seja impactado, visando a continuidade de todas as operações.

O resultado deste trabalho, possibilitou a padronização do método de ensaio de posicionamento do distribuidor de uma turbina Francis em água morta, pois utilizando-o como base, pode-se aplicar tal ensaio em qualquer unidade geradora com turbina do tipo Francis, atuando na malha de controle do regulador de velocidade caso seja necessário e aplicando métodos para correção aqui citados, contribuindo para a produção de eletricidade com frequência e potência

estáveis.

Especificamente quanto ao resultado operacional da malha de controle do regulador de velocidade da UG 05 da UHE Ilha Solteira, observa-se ajustes precisos na fase de comissionamento, pois os tempos de respostas obtidos da malha através do ensaio, estão dentro dos valores de projeto e são considerados ágeis segundo padrões de regulação e controle.

Um dos objetivos deste trabalho é auxiliar na qualidade do SIN, através do ajuste da malha de controle do regulador de velocidade de turbinas do tipo Francis, assim considera-se os resultados satisfatórios, tanto pelo aprendizado, quanto pela contribuição aqui deixada através dos estudos.

Agradecimento: Agradecemos primeiramente à Deus, pela grande amizade entre os autores, contribuindo grandemente para realização deste trabalho; à nossas famílias e amigos, base sólida para nossa caminhada ao longo da graduação e a Prof^a Dr^a Catarina Akiko Miyamoto pelo auxílio na confecção deste artigo científico.

REFERÊNCIAS

BANZELLA; SILVA JR. Sistema de controle princípios e métodos de projeto. Ed. UFRGS, 2005.

BRASIL. Lei no 4.454, de 6 de novembro de 1964. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/l4454.htm>. Acesso em 09 abr 2022.

CORSICO, F. H.; ARAUJO, T. C. Controle da frequência elétrica no gerador de indução com dupla alimentação -

Trabalho de conclusão de curso 2013. Disponível em <<http://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/286.pdf>>. Acesso em 09 abr 2022.

CTG BRASIL - Guia de manutenção - Ensaio de posicionamento do mecanismo distribuidor em água morta, UHE Ilha Solteira 2021.

FLUKE. O que é a frequência?. Disponível em <<https://www.fluke.com/pt-pt/saber-mais/blog/aplicacoes-eletricas/o-que-e-a-frequencia>>. Acesso em 09 abr 2022.

IEC guia 60308 – Hydraulic Turbines – Testing of control systems, 2005.

IEC guia 61362 – Guide to specification of hydraulic turbine control systems, 2012.

IEEE padrão 1207 - IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units, 2011.

KUNDUR, P. Power System Stability and Control. McGraw Hill, 1994.

MACINTYRE, A. J. Máquinas Motrizes Hidráulicas. Ed. Guanabara Dois, 1983.

REIVAX – Regulador de Tensão e Velocidade RTVX POWER, 2018.

VERIFICAÇÃO DE ROTEIRO DE CÁLCULOS PARA DIMENSIONAMENTO DE ROTOR PARA TURBINA TIPO FRANCIS. Disponível em <http://repositorio.ut-fpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11756/2/GP_COEME_2016_1_03.pdf>. Acesso em 07 jun 2022.