

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

WELINTON BARCELOS GARCIA

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS
UTILIZANDO CONTROLADORES CLÁSSICO E FUZZY**

Araranguá, SC
2018

WELINTON BARCELOS GARCIA

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS
UTILIZANDO CONTROLADORES CLÁSSICO E FUZZY**

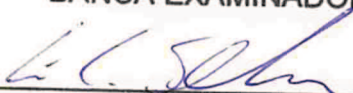
Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Universidade Federal de
Santa Catarina, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Engenheiro(a) de Energia.

Orientador:
Prof. Dr. César Cataldo Scharlau

Coorientador:
Prof. Dr. Leonardo Elizeire Bremermann

Araranguá, 25 de junho de 2018.

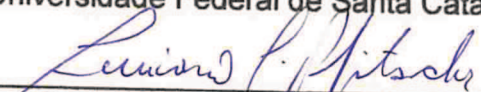
BANCA EXAMINADORA



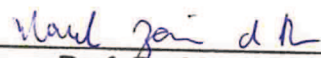
Prof. Dr. César Cataldo Scharlau (Orientador)
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Diego Issicaba
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Marcelo Zannin da Rosa
Universidade Federal de Santa Catarina

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMECAÑNICOS UTILIZANDO CONTROLADORES CLÁSSICO E FUZZY

Welinton Barcelos Garcia *

2018

Resumo

A qualidade da energia fornecida por um sistema elétrico de potência está relacionada a fatores como tensão e frequência constantes que garantem a estabilidade do sistema. Quando um sistema perde sua estabilidade significa que perde a capacidade de estar ativo e dentro das condições de operação pré-definidas, ou seja, perde a capacidade de operar. O objetivo desse trabalho é implementar uma plataforma digital, que contenha os componentes de um sistema completo de geração de energia elétrica, para simulação e análise de eventos transitórios. Para atender ao objetivo, serão implementados os modelos matemáticos na forma de diagrama de blocos no *software Matlab/Simulink*. Além disso, serão feitas simulações em malha aberta para a validação dos mesmos e aplicação de estratégias de controle clássico e Fuzzy para a resposta a uma perturbação. A expectativa com esse trabalho é desenvolver uma plataforma que possa ser utilizada posteriormente em estudos de análise transitória e estabilidade dos sistemas de potência.

Palavras-chaves: Estabilidade. Sistema elétrico de potência. Controladores. Controle Fuzzy.

1 Introdução

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é composto pelos subsistemas de geração, transmissão, subtransmissão e distribuição que levam a energia elétrica convertida nos

*Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88905-355. E-mail: welintonbarcelosg@gmail.com

geradores até o seu destino final (MACHOWSKI et al., 1997). Um SEP pode variar de tamanho e componentes estruturais. Porém, qualquer sistema deste tipo tem como principal característica a utilização de máquinas síncronas para a geração da energia elétrica por meio da conversão de energia mecânica obtida através da utilização de recursos naturais (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

A interligação do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica propicia maior confiabilidade, redução de custos e atendimento da crescente demanda de energia. Entretanto, gera algumas desvantagens como maior risco de apagões de maior proporção geográfica, maiores correntes de curto-circuito, tornando a operação do sistema mais complexa. Para que a confiabilidade do sistema seja adequada, é necessário um planejamento detalhado da operação (MATA, 2005).

A qualidade da energia fornecida pelo SEP está relacionada a diversos fatores, como a capacidade de atender a demanda de energia requerida pelos consumidores que são representados pela carga, a confiabilidade do sistema e a sua estabilidade. A estabilidade é definida como a habilidade de estar ativo e dentro das condições de operação pré-definidas pelo operador. Entre as principais condições de operação estão a frequência e tensão constantes (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

A estabilidade pode ser ameaçada quando uma perturbação qualquer atinge o sistema elétrico de potência (DIAS; PILONI, 2010). Estas perturbações podem ser ocasionadas por curtos-circuitos, rompimento de linhas de transmissão, descargas atmosféricas, entrada ou saída de cargas de grande porte, e retiram o sistema do seu ponto de operação original (MATA, 2005).

A instabilidade pode ser definida, por exemplo, quando uma máquina síncrona perde seu sincronismo com a rede e deve ser retirada do sistema de potência. Quando ocorre um problema desse tipo, todo o sistema tem que ser rearranjado para garantir a estabilidade do mesmo (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

Para evitar essa perda de sincronismo, algumas técnicas de controle são largamente utilizadas no SEP, incluindo a utilização de controladores clássicos (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Porém, controladores modernos passaram a ser muito utilizados para melhorar ainda mais a resposta do SEP a qualquer tipo de perturbação (ABIDO; ABDEL-MAGID, 1998).

Diante do exposto, nota-se a importância do estudo da estabilidade dos sistemas elétricos de potência para garantir a qualidade da energia fornecida. O presente trabalho, portanto, busca elaborar uma plataforma computacional, composta por um conjunto de blocos correspondentes aos diferentes tipos de componentes estruturais presentes no sistema de geração de um SEP. Assim, será disponibilizada uma ferramenta que possa ser utilizada futuramente, para fins educacionais e de pesquisa, na simulação determinados eventos transitórios eletromecânicos para analisar a resposta do sistema de geração

aos mesmos. Para que se atinja o objetivo estabelecido, diferentes tipos de conversão das fontes primárias de energia, sistemas de excitação e máquina síncrona foram modelados através de diagramas de bloco a partir das equações que regem os efeitos físicos associados a eles. A partir desses diagramas de blocos, foram implementados elementos dentro do *software Matlab/Simulink* que vão compor a plataforma. Os modelos foram simulados em malha aberta para validação dos mesmos e, por fim, a realização de simulações em malha fechada com duas estratégias de controle: uma clássica, com a utilização do controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), e com um controlador moderno como malha suplementar junto ao controlador PID, para avaliar a resposta do modelo a uma perturbação.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: os conceitos pertinentes a este tema são apresentados no referencial teórico na seção 2. A metodologia é detalhada na seção 3. Os resultados obtidos são discutidos na seção 4. Por fim, a conclusão é descrita na seção 5.

2 Referencial teórico

Esta seção descreve os conceitos pertinentes a este trabalho, abordando aspectos referentes à SEP, controladores e aplicações.

2.1 Sistema elétrico de potência

O SEP pode ser dividido em geração, transmissão, subtransmissão e distribuição de energia. O sistema de geração de energia elétrica é constituído de três grandes componentes: o gerador, a fonte primária e o sistema de excitação. Esses componentes são fundamentais para que a energia elétrica seja gerada respeitando os limites de frequência e tensão que garantem a qualidade da energia.

Na sequência, os principais elementos que compõem o sistema de geração do SEP serão brevemente descritos.

2.1.1 Geradores

Na geração, a energia mecânica, obtida a partir dos recursos primários disponíveis, é convertida em energia elétrica através da utilização de máquinas elétricas (por exemplo, síncronas) com o objetivo de atender a uma determinada demanda (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

As máquinas síncronas são largamente utilizadas em aplicações como geradores ou motores (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Uma máquina síncrona é composta por dois circuitos acoplados magneticamente. O primeiro é a armadura trifásica, localizada no estator e responsável pela transferência de potência elétrica em corrente alternada entre a

máquina e o sistema de potência ao qual ela se conecta. O segundo circuito é o campo, localizado no rotor e alimentado com corrente contínua, de modo a produzir um fluxo magnético de amplitude ajustável (MATOS, 2012).

Em um gerador síncrono, um campo magnético é produzido no rotor. Durante o projeto do rotor, para obter esse campo magnético, pode-se optar pelo uso de um ímã permanente ou de um eletroímã, obtido pela aplicação de uma corrente CC a um enrolamento desse rotor (CHAPMAN, 2013).

O rotor de um gerador síncrono é essencialmente um grande eletroímã. Os polos magnéticos do rotor podem ser construídos de duas formas: salientes ou lisos. Um polo saliente é um polo magnético que se sobressai radialmente do rotor. Por outro lado, um polo liso é um polo magnético com os enrolamentos encaixados e nivelados com a superfície do rotor. O rotor do gerador é então acionado por uma fonte motriz primária, que produz um campo magnético girante dentro da máquina (CHAPMAN, 2013). A Figura 1 mostra uma imagem de máquina síncrona com um rotor de polos salientes.

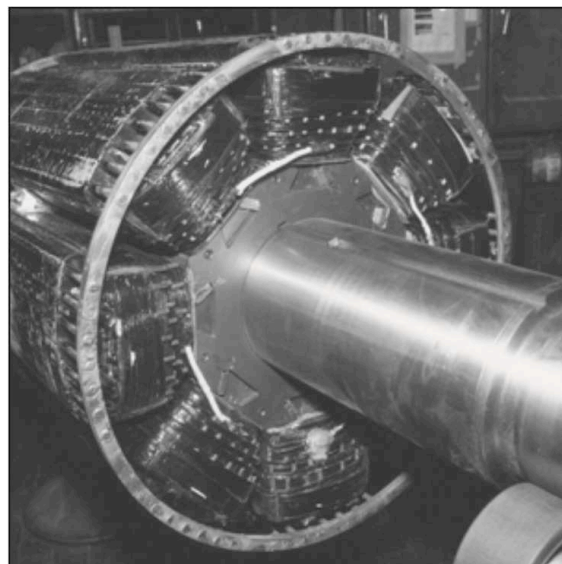


Figura 1 – Rotor de oito polos salientes de uma máquina síncrona. Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Máquinas síncronas acopladas a turbinas hidráulicas operam em velocidades baixas e requerem um número relativamente elevado de polos. Turbinas a vapor ou a gás, por outro lado, operam a altas velocidades e, geralmente, tem apenas dois ou quatro polos (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

2.1.2 Sistemas de excitação

A necessidade do uso dos sistemas de excitação se faz presente quando a máquina síncrona não é do tipo ímã permanente. Os sistemas de excitação têm como finalidade pro-

ver corrente contínua para o enrolamento de campo dos geradores síncronos (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

A Figura 2 mostra o diagrama de blocos de um sistema de controle de excitação genérico com as principais componentes. O regulador tem como função processar e amplificar o sinal de entrada para um determinado nível de tensão que seja apropriado para o controle do excitador. Outro componente do sistema, o transdutor de tensão terminal, atua como um sensor da tensão terminal da máquina, avaliando a diferença entre as tensões terminal e de referência. Já o compensador de carga tem como finalidade compensar as diferenças existentes entre os locais onde as tensões são medidas e onde elas devem ser controladas. Adicionalmente, o Estabilizador de Sistema de Potência (PSS, do inglês *Power System Stabilizer*) é responsável por injetar sinais adicionais estabilizantes, com o intuito de proporcionar amortecimento às oscilações dos SEPs. Esse estabilizador funciona como uma malha secundária para controle de frequência, atuando no sistema de excitação. Finalmente, os limitadores e circuitos de proteção compreendem funções de proteção e controle que irão garantir que os limites de capacidade de excitação do gerador não sejam excedidos. Algumas destas funções são: limitador de corrente de campo, limite de máxima excitação, limite de tensão terminal, limitação de subexcitação (COELHO, 2016).

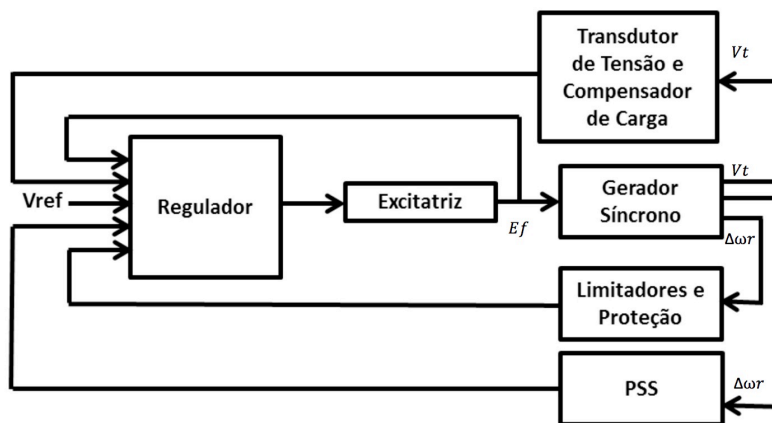


Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema de controle de excitação. Fonte: Adaptado de (COELHO, 2016)

Os sistemas de excitação podem ser classificados em três tipos: sistemas de excitação em corrente contínua (CC), sistemas de excitação em corrente alternada (CA) e sistemas de excitação estáticos. Os sistemas de excitação CC utilizam geradores de corrente contínua como fontes para prover a corrente para o rotor através dos anéis deslizantes. Esse tipo de sistema de excitação está desaparecendo gradualmente enquanto os sistemas mais antigos são substituídos por novos do tipo CA ou estáticos (KUNDUR; BALU;

LAUBY, 1994). Os sistemas de excitação CA utilizam alternadores como fonte. É necessário que o sinal de saída do alternador passe por um retificador, controlado ou não, para produzir uma corrente contínua que o gerador necessita (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Já nos sistemas de excitação estáticos, a corrente contínua é fornecida através de enrolamentos de transformadores ou geradores auxiliares e retificadores. A grande vantagem do sistema estático é que permite reduzir o tempo de reposta na regulação, já que atua diretamente no enrolamento de campo do gerador síncrono (NICOLAU, 2016).

2.1.3 Fontes primárias

As fontes primárias para a geração de energia elétrica compreendem a conversão da energia cinética da água ou da energia térmica provida de fontes fósseis ou nuclear em energia mecânica, para depois ser convertida em energia elétrica ao passar por um gerador síncrono (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). As principais máquinas utilizadas para essa conversão são: turbinas hidráulicas, turbinas a vapor, turbinas a gás, turbinas eólicas e motores a diesel. A máquina primária é a responsável pelo acionamento mecânico do gerador de energia elétrica (COSTA, 2012).

O recurso natural mais abundante na Terra é a água, sendo uma das poucas fontes para produção de energia que não contribui para o aquecimento global – o principal problema ambiental da atualidade (MANTOVANI; NEUMANN; EDLER, 2017). No Brasil, representa a maior fonte para produção de energia elétrica, equivalente a cerca de 75% quando comparada aos demais tipos de energia. Este recurso energético é considerado uma fonte renovável e limpa (MANTOVANI; NEUMANN; EDLER, 2017).

Para conversão do potencial energético da água em energia mecânica existem dois tipos básicos de turbinas hidráulicas: de reação, como a Francis, e de impulso, também conhecidas como Pelton (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). A primeira obtém energia mecânica a partir da energia cinética e da pressão da água em escoamento através do rotor, enquanto que a segunda obtém energia mecânica apenas da energia cinética da água em escoamento através do rotor (COSTA, 2003). Ambos os tipos aproveitam a energia da água armazenada em um reservatório, com uma altura considerável em relação a turbina. A água armazenada é conduzida por um conduto até a turbina e depois é descarregada em um curso d'água abaixo da turbina (COSTA, 2003).

A turbina a vapor converte a energia térmica associada ao vapor a altas temperaturas e altas pressões em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica através do gerador. A fonte de calor pode ser um reator nuclear ou combustíveis fósseis como carvão, gás ou óleo (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). O vapor que entra a altas temperaturas e pressões é entregue ao condensador com baixa temperatura e baixa pressão no fim do processo (COSTA, 2003). As turbinas a vapor podem apresentar uma variedade enorme de configurações, com estágios de alta pressão, média pressão e baixa pressão,

além da presença de reaquecedores. Também podem apresentar mais de um eixo (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

2.2 Controladores

Um sistema de controle consiste em subsistemas ou processos construídos com o objetivo de obter uma saída estável e desejada para um determinado desempenho. Duas das principais medidas de desempenho são: a resposta transitória e o erro em regime permanente. A vantagem de se usar um sistema de controle é a precisão que se alcança o objetivo desejado, além da habilidade de compensar perturbações (NISE, 2002).

Os controladores são largamente utilizados no controle de um SEP para atingir as condições de operações para se manter estável e em sincronismo. Segundo Nicolau (2016), os controladores clássicos podem ser utilizados no controle da tensão através do sistema de excitação. Os controladores clássicos também podem ser utilizados para o controle da frequência (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Para o controle de frequência, ainda pode-se aplicar controladores modernos, como Fuzzy (HOANG; TOMSOVIC, 1996).

A seguir, serão vistos alguns dos principais tipos de controle e suas aplicações em SEPs.

2.2.1 Controladores clássicos

O projeto de um controlador clássico pode ser feito através da resposta ao lugar geométrico das raízes ou da frequência. Existem diversos tipos de controle clássico, como por exemplo: controlador de avanço de fase, controlador de atraso de fase, controlador Proporcional Derivativo (PD), controlador Proporcional Integral (PI) e o controlador PID (NISE, 2002; DORF; BISHOP, 2011).

A Figura 3 mostra a representação do controlador PID em diagrama de blocos. Este controlador é utilizado para melhorar a resposta transitória e, ao mesmo tempo, melhorar o erro em regime permanente. O controlador PID pode ser projetado a partir de um controlador PD seguido de um controlador PI (NISE, 2002). No contexto dos SEPs, este controlador costuma ser utilizado para o controle da velocidade angular da turbina (SRIDHAR; PRASAD, 2014). O controlador PID também pode ser utilizado para o controle do sistema de excitação (NICOLAU, 2016).

Existem muitos métodos para determinar os valores aceitáveis dos ganhos do controlador PID, representados por K_1 , K_2 e K_3 na Figura 3. O processo para determinar esses ganhos é, geralmente, chamado de sintonia de PID. Uma abordagem comum é a sintonia manual de PID, onde os ganhos do controlador são obtidos por tentativa e erro com uma análise baseada em respostas ao degrau ou, em alguns casos, utilizando testes re-

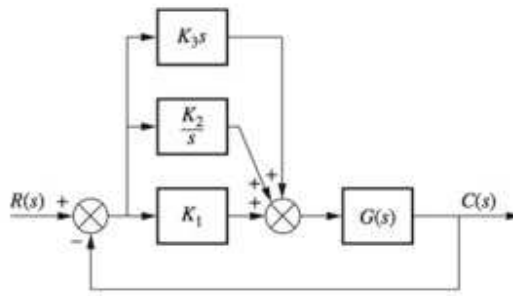


Figura 3 – Diagrama de blocos de um controlador PID. Fonte: (NISE, 2002)

ais nos sistemas e decidindo o valor dos ganhos através da observação dos resultados. (DORF; BISHOP, 2011). Um método mais analítico é conhecido como método de sintonia Ziegler-Nichols. Esse método tem algumas variações em suas abordagens. A primeira abordagem é baseada em conceitos em malha fechada e requer a obtenção do ganho crítico e do período crítico. A segunda abordagem é baseada nos conceitos em malha aberta e depende de curvas de reação. Uma sugestão consiste em considerar as regras de Ziegler-Nichols para se obter valores aproximados e, em seguida, realizar iterações de refinamento (DORF; BISHOP, 2011). O processo de sintonia de um controlador pode ser facilitado com o auxílio de uma ferramenta de simulação computacional, como a desenvolvida nesse trabalho.

2.2.2 Controladores modernos

Nos últimos anos, os sistemas inteligentes em controle tem despertado grande interesse. Dentre as técnicas mais utilizadas são as redes neurais e a lógica Fuzzy (BILOBROVEC; MARÇAL; KOVALESKI, 2004). A lógica Fuzzy é uma técnica que incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle (SIMOES; SHAW, 2007).

Embora as estratégias de controle inteligente possam ser implementados por outros meios, a lógica Fuzzy é frequentemente utilizada por ser mais eficiente devido a diversos pontos. Por exemplo, as estratégias de controle Fuzzy nascem da experiência e experimentos ao invés de modelos matemáticos e podem envolver um grande número de entradas (GOMIDE; GUDWIN, 1994). A lógica Fuzzy vem sendo utilizada no desenvolvimento de controladores devido a sua característica da ação de controle Fuzzy poder ser descrita de modo qualitativo, ou seja, uma ação que muitas vezes é realizada por um operador experiente do sistema torna-se difícil de se transformar em uma equação matemática, mas pode ser facilmente implementada por uma expressão qualitativa na lógica Fuzzy (COSTA et al., 2003).

Um controlador Fuzzy é composto de uma interface de fuzzificação, base de conhecimento, lógica de tomada de decisões e interface de defuzzificação. Na interface de fuzzificação, os valores discretos das variáveis de entrada, provenientes de sensores de

grandezas físicas ou de dispositivos de entrada computadorizadas, são convertidos para um intervalo que pode ser associados a rótulos linguísticos (muito alto, pouco baixo, pouco alto, muito alto, etc.) por meio das funções de pertinência (SIMOES; SHAW, 2007). As funções de pertinência são funções numéricas gráficas ou tabuladas que atribuem valores de pertinência Fuzzy para valores discretos de uma variável. Um número prático de funções de pertinência é entre dois e sete. Porém, quanto maior o número de funções de pertinência maior é a precisão e maior a demanda computacional (SIMOES; SHAW, 2007). A Figura 4 mostra um exemplo do conjunto de funções de pertinência de um controlador Fuzzy. Onde, μ é o grau de pertinência, U é universo de discurso, que compreende o intervalo de entradas do Fuzzy. As funções foram nomeadas como: NG (Negativo Grande), NM (Negativo Médio), NP (Negativo Pequeno), ZE (Zero), PP (Positivo Pequeno), PM (Positivo Médio) e PG (Positivo Grande).

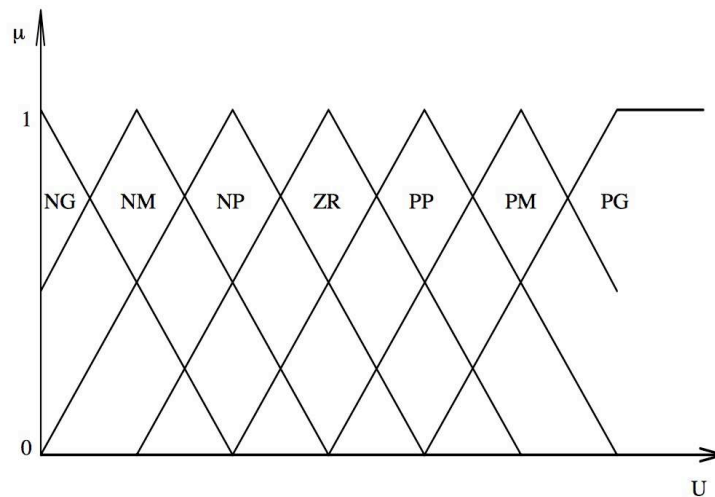


Figura 4 – Exemplo de um conjunto de funções de pertinência. Fonte: (GOMIDE; GUDWIN, 1994)

A base de conhecimento representa o modelo do sistema a ser controlado e consiste em uma base de dados (funções de pertinência) e uma base de regras Fuzzy. A lógica de tomada de decisões utiliza as implicações Fuzzy para simular a tomada de decisões humana gerando as ações de controle. Já a interface de defuzzificação consiste em obter um único valor discreto utilizável em uma ação de controle. Existem alguns métodos que são utilizados para a defuzzificação, porém, o mais utilizado é o do centroide (SIMOES; SHAW, 2007).

A utilização de controladores Fuzzy em SEPs já é muito difundida. Diferentes trabalhos já publicados utilizam esse tipo de controlador para a melhora da resposta da frequência. Segundo Hoang e Tomsovic (1996), o controlador Fuzzy pode ser aplicado no sistema de excitação. Porém, também pode-se aplicar o controlador Fuzzy na turbina para controlar a frequência (COSTA et al., 2003).

2.3 Ferramentas de simulação de SEPs

Existem alguns programas comerciais que tem como objetivo simular possíveis perturbações dentro do SEP. Dentro deles, destaca-se o programa ANATEM, desenvolvido pelo CEPEL, que se constitui em uma ferramenta efetiva para a realização de simulações do desempenho dinâmico dos sistemas elétricos de potência (OLIVEIRA et al., 1994). O EUROSTAG é um *software* de simulação desenvolvido para a simulação transitória de SEPs muito utilizado para estudos de estabilidade dos mesmos (ANTOINE; STUBBE, 1992). Outro programa muito utilizado para a simulação de perturbações dentro de um SEP é o *Powerworld*, que apresenta diversos modelos de sistema de excitação e de geradores síncronos (SIMULATOR, 2005).

3 Metodologia

A partir das equações matemáticas que descrevem os fenômenos físicos que ocorrem no gerador síncrono, nas turbinas hidráulicas e a vapor, e nos sistemas de excitação, foram elaborados diagramas de blocos. Os diagramas de bloco são importantes para a implementação dos sistemas dentro do ambiente *Simulink* no *software Matlab*. Para que se possa modelar de um modo mais simples, será utilizado o sistema de base por unidade (PU), no qual as grandezas associadas ao sistema são divididas por valores de base previamente definidos. Depois, foram realizados testes em malha aberta e malha fechada para verificar o funcionamento e a utilização dos elementos elaborados. As etapas de desenvolvimento do trabalho serão detalhadas na sequência.

3.1 Gerador síncrono

A modelagem do gerador síncrono foi feita utilizando os eixos direto (d) e de quadratura (q) da máquina síncrona. Para a descrição das máquinas síncronas, assumiu-se que os efeitos da histerese e da saturação magnética são desprezíveis e que a máquina síncrona está ligada a um barramento infinito para se fazer uma modelagem mais simples, porém ainda realística do sistema (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). A Figura 5 mostra o esquema um gerador conectado a uma barra infinita, onde E_t é a tensão terminal do gerador, E_b é a tensão na barra infinita e Z_{eq} é a impedância da linha de transmissão.

As equações do gerador síncrono podem ser divididas em dois principais tipos. O primeiro são as equações diferenciais que descrevem matematicamente os fenômenos físicos que ocorrem dentro dos eixos direto e de quadratura para a parte elétrica e também as equações mecânicas dentro do gerador. Segundo Arrillaga e Watson (2001), as equações (1) e (2) representam as equações do movimento da máquina síncrona.

$$\frac{d\Delta\omega_r(t)}{dt} = \frac{P_m(t) - P_e(t) - K_d\Delta\omega_r(t)}{2H} \quad (1)$$

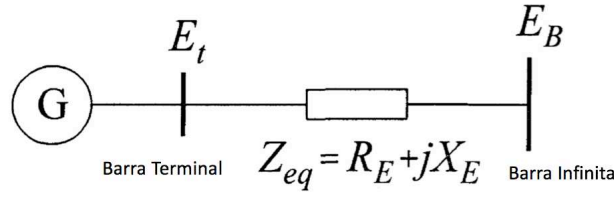


Figura 5 – Gerador conectado a uma barra infinita. Fonte: Adaptado de (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega_o(t)\Delta\omega_r(t) \quad (2)$$

$$\Delta\omega_r(t) = \omega_r(t) - \omega_o(t) \quad (3)$$

Onde $P_m(t)$ é a potência mecânica fornecida pela turbina, $P_e(t)$ é a potência elétrica da máquina síncrona, K_d é a constante de amortecimento da máquina, H é a constante de inércia combinada da máquina e da turbina, ω_r é a velocidade do rotor, ω_o é a velocidade síncrona e δ é o ângulo do rotor.

Para o eixo de quadratura, foram considerados os efeitos transitórios e subtransitórios que são descritos matematicamente a partir das equações (4) e (5). A equação (6) representa o eixo direto (ARRILLAGA; WATSON, 2001).

$$\frac{dE'_q(t)}{dt} = \frac{E_f(t) + (X_d - X'_d)I_d(t) - E'_q(t)}{T'_{qo}} \quad (4)$$

$$\frac{dE''_q(t)}{dt} = \frac{E'_q(t) + (X'_d - X''_d)I_d(t) - E''_q(t)}{T''_{qo}} \quad (5)$$

$$\frac{dE''_d(t)}{dt} = \frac{-(X_q - X''_q)I_q(t) - E''_d(t)}{T''_{do}} \quad (6)$$

Nestas equações, $E_f(t)$ representa a tensão de campo aplicada à máquina síncrona, $E'_q(t)$ é a tensão transitória no eixo q , $E''_q(t)$ é a tensão subtransitória no eixo q , $E''_d(t)$ é a tensão subtransitória no eixo d , $I_d(t)$ é a corrente no eixo d e $I_q(t)$ é a corrente no eixo q , X_q é a reatância no eixo q , X'_q é a reatância transitória no eixo q , X''_q é a reatância subtransitória no eixo q , X_d é a reatância no eixo d , X'_d é a reatância transitória no eixo d , X''_d é a reatância subtransitória no eixo d , T'_{qo} é constante de tempo transitória de circuito aberto no eixo q , T''_{do} é constante de tempo subtransitória de circuito aberto no eixo d e T''_{qo} é constante de tempo subtransitória de circuito aberto no eixo q .

O segundo tipo de equações utilizadas são as equações algébricas. A tensão de eixo direto $V_d(t)$, a tensão no eixo de quadratura $V_q(t)$ na barra terminal do gerador e o módulo da tensão $V_t(t)$ são calculadas a partir das equações (7), (8) e (9), respectivamente. As equações (10) e (11) representam as tensões na barra infinita para os eixos direto e de quadratura (ARRILLAGA; WATSON, 2001).

$$V_d(t) = E_d''(t) - R_a I_d(t) - X_q'' I_q(t) \quad (7)$$

$$V_q(t) = E_q''(t) - R_a I_q(t) + X_d'' I_d(t) \quad (8)$$

$$V_t(t) = \sqrt{(V_q(t))^2 + (V_d(t))^2} \quad (9)$$

$$V_b \text{sen}(\delta(t)) = -V_d(t) + R_e I_d(t) + X_e I_q(t) \quad (10)$$

$$V_b \text{cos}(\delta(t)) = V_q(t) - R_e I_q(t) + X_e I_d(t) \quad (11)$$

Onde V_b é a tensão na barra infinita, R_a é a resistência na linha de transmissão até a barra infinita e X_e é a reatância da linha de transmissão até a barra infinita.

Para calcular as correntes do eixo direto e quadratura, deve-se substituir as equações (7) em (10) e (8) em (11). Resolvendo o sistema de equações encontrado, chega-se nas equações (12) e (13).

$$I_q(t) = \frac{(R_a + R_e)(E_q''(t) - V_b \text{cos}(\delta(t))) + (X_e + X''d)(E_d''(t) + V_b \text{sen}(\delta(t)))}{(R_a + R_e)^2 + (X_e + X''d)(X_e + X''q)} \quad (12)$$

$$I_d(t) = \frac{(R_a + R_e)(E_d''(t) + V_b \text{sen}(\delta(t))) + (X_e + X''q)(-E_q''(t) + V_b \text{cos}(\delta(t)))}{(R_a + R_e)^2 + (X_e + X''d)(X_e + X''q)} \quad (13)$$

A potência elétrica da máquina síncrona considera a potência ativa fornecida mais as perdas na armadura e é representada pela equação (14). Já as potências ativa (P_t) e reativa (Q_t) fornecidas a barra infinita são dadas pelas equações (15) e (16), respectivamente.

$$P_e(t) = V_d(t)I_d(t) + V_q(t)I_q(t) + R_a((I_q(t))^2 + (I_d(t))^2) \quad (14)$$

$$P_t(t) = V_d(t)I_d(t) + V_q(t)I_q(t) \quad (15)$$

$$Q_t(t) = V_d(t)I_q(t) - V_q(t)I_d(t) \quad (16)$$

As condições iniciais do gerador podem ser encontradas a partir de três valores: \bar{V}_t , que é a tensão no terminal, \bar{P}_t , que é a potência ativa fornecida pelo gerador, e \bar{Q}_t , que é a potência reativa fornecida pelo gerador. A partir desses dados, pode-se calcular a potência aparente \bar{S} , dada pela equação (19), e o fator de potência $\bar{\phi}$, descrito pela equação (18).

$$\bar{S} = \sqrt{(\bar{P}_t)^2 + (\bar{Q}_t)^2} \quad (17)$$

$$\bar{\phi} = \arccos\left(\frac{\bar{P}_t}{\bar{S}}\right) \quad (18)$$

O módulo da corrente do gerador \bar{I}_t pode ser obtido por:

$$\bar{I}_t = \frac{\bar{S}}{\bar{V}_t} \quad (19)$$

O ângulo $\bar{\delta}_i$ da tensão do terminal V_t é dado pela seguinte equação:

$$\bar{\delta}_i = \arctan\left(\frac{X_q\bar{I}_t\cos(\bar{\phi}) - R_a\bar{I}_t\sin(\bar{\phi})}{X_q\bar{I}_t\sin(\bar{\phi}) + R_a\bar{V}_t\cos(\bar{\phi})}\right) \quad (20)$$

Os valores de \bar{V}_d e \bar{V}_q podem ser encontrados a partir das equações (21) e (22).

$$\bar{V}_d = -\bar{V}_t\sin(\bar{\delta}_i) \quad (21)$$

$$\bar{V}_q = \bar{V}_t\cos(\bar{\delta}_i) \quad (22)$$

Os valores de \bar{I}_d e \bar{I}_q são calculados com:

$$\bar{I}_d = -\bar{I}_t\sin(\bar{\delta}_i + \bar{\phi}) \quad (23)$$

$$\bar{I}_q = \bar{I}_t\cos(\bar{\delta}_i + \bar{\phi}) \quad (24)$$

A partir dos valores iniciais de \bar{V}_d , \bar{V}_q , \bar{I}_d e \bar{I}_q , podem-se encontrar os valores iniciais de E_d'' e E_q'' através das equações (7) e (8). As demais condições são encontradas zerando as derivadas das equações (4), (5) e (6).

3.2 Sistemas de excitação

A partir da junção de alguns elementos individuais que serão modelados, como amplificadores e excitatriz corrente contínua (CC), consegue-se montar qualquer sistema de excitação. A modelagem dos elementos que compõe os diferentes tipos de sistemas de excitação será descrita nessa seção.

3.2.1 Excitatriz CC

Com base no circuito que representa a excitatriz CC, visto na Figura 6, pode-se aplicar as leis de Kirchoff para obter as equações (25) e (26).

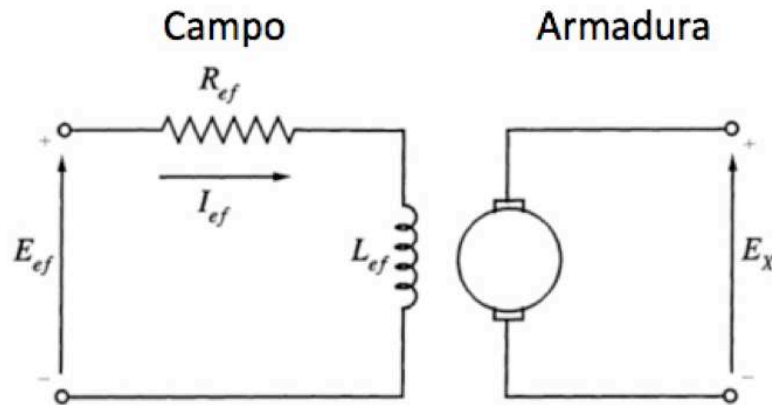


Figura 6 – Circuito da excitatriz CC. Fonte: Adaptado de (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

$$E_{ef}(t) = R_{ef}I_{ef}(t) + \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (25)$$

$$\psi(t) = L_{ef}I_{ef}(t) \quad (26)$$

Nestas equações, $E_{ef}(t)$ é a tensão de campo da excitatriz, R_{ef} é a resistência de campo da excitatriz, $I_{ef}(t)$ é a corrente de campo da excitatriz, L_{ef} é a indutância de campo da excitatriz e $\psi(t)$ é o fluxo entre o campo e a armadura.

A tensão de saída da excitatriz pode ser descrita por

$$E_X(t) = K_X\psi(t) \quad (27)$$

onde E_X é a tensão de saída da excitatriz, K_X é uma constante que depende da configuração dos enrolamentos da armadura da excitatriz e I_{ef} é a corrente de campo da excitatriz. A equação (27) depende da corrente corrente de campo da excitatriz I_{ef} que é uma função não-linear devido a saturação magnética. Considerando os efeitos não-lineares, a corrente de campo da excitatriz pode ser definida como:

$$I_{ef}(t) = \frac{E_X(t)}{R_g} + \Delta I_{ef}(t) \quad (28)$$

$$\Delta I_{ef}(t) = E_X(t) S_E(E_X) \quad (29)$$

onde R_g pode ser descrito como inclinação da função tangente à função de saturação e $S_E(E_X)$ é a função de saturação.

A partir das equações (25) a (29), obtém-se

$$E_{ef}(t) = K_E E_X(t) + S_E(E_X) E_X(t) + T_E \frac{dE_X(t)}{dt} \quad (30)$$

onde T_E é a constante de tempo de excitação, K_E é o ganho de excitação e V_X é o E_X ajustado pela função de saturação, definidos por:

$$K_E = \frac{R_{ef}}{R_g} \quad (31)$$

$$T_E = \frac{1}{K_X} \quad (32)$$

$$V_X(t) = E_X(t) S_E E_X = A_{EX} e^{B_{EX} E_X(t)} \quad (33)$$

onde A_{EX} e B_{EX} são os parâmetros para a aproximação da função de saturação. A Figura 7 representa a equação (30) em diagrama de blocos no domínio da frequência.

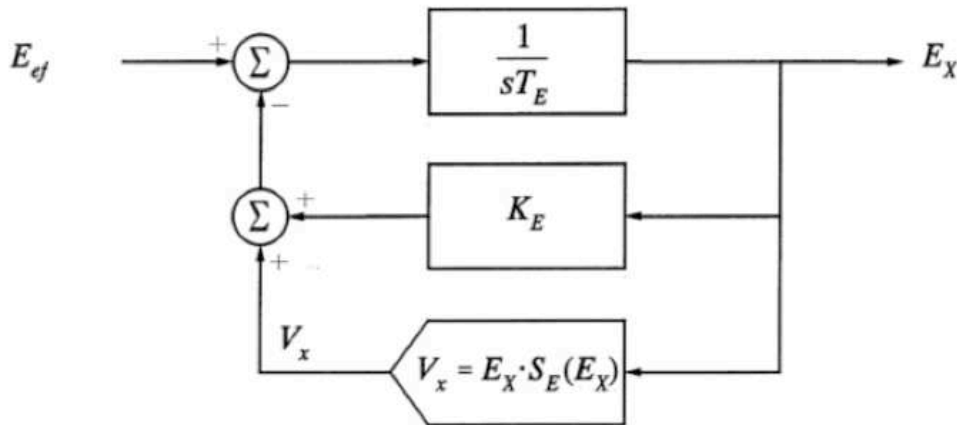


Figura 7 – Diagrama de blocos da excitatriz CC. Fonte: Adaptado de (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

3.2.2 Amplificadores

Os amplificadores magnéticos e eletrônicos podem ser caracterizados por uma função de transferência de primeira ordem com um ganho e uma constante de tempo. O sinal de saída dos amplificadores são limitados pela saturação ou pela limitação da fonte

de energia. A Figura 8 mostra o diagrama de blocos do amplificador, no qual V_i é a tensão na entrada, V_o é a tensão na saída, K_A é o ganho do amplificador, T_A é a constante de tempo do amplificador, V_{RMAX} é o limite máximo de tensão na saída do amplificador e V_{RMIN} é o limite mínima de tensão na saída do amplificador.

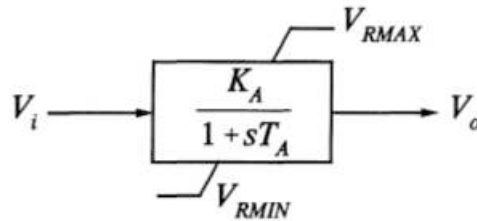


Figura 8 – Diagrama do amplificador. Fonte:(KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

3.2.3 Transdutor

O transdutor atua como um sensor da tensão terminal da máquina, avaliando a diferença entre as tensões terminal e de referência, e pode ser modelado matematicamente por uma função de transferência de primeira ordem com uma constante de tempo T_r e com ganho unitário.

3.3 Turbinas

As turbinas transformam a energia contida no recurso natural em energia mecânica para alimentar o gerador. As turbinas hidráulicas utilizam a energia cinética da água, enquanto as turbinas a vapor utilizam a energia térmica dos combustíveis fósseis ou da fissão nuclear (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Neste trabalho, foram implementados componentes no *Simulink* que simulam o comportamento físico desses dois tipos de turbina. Na sequência, os procedimentos que foram realizados serão descritos.

3.3.1 Turbina hidráulica

A Figura 9 mostra o esquema da hidrelétrica que será considerada para modelagem. As equações (34), (35), (36) e (37) regem a dinâmica hidrodinâmica, assumindo que: o conduto é inelástico e que o fluido é incompressível, a resistência hidráulica é desprezível, a velocidade da água varia com a abertura da comporta e com o quadrado da diferença de altura entre a superfície do reservatório até a comporta, e a potência mecânica é proporcional a diferença de altura entre a superfície do reservatório até a comporta e a velocidade da água (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

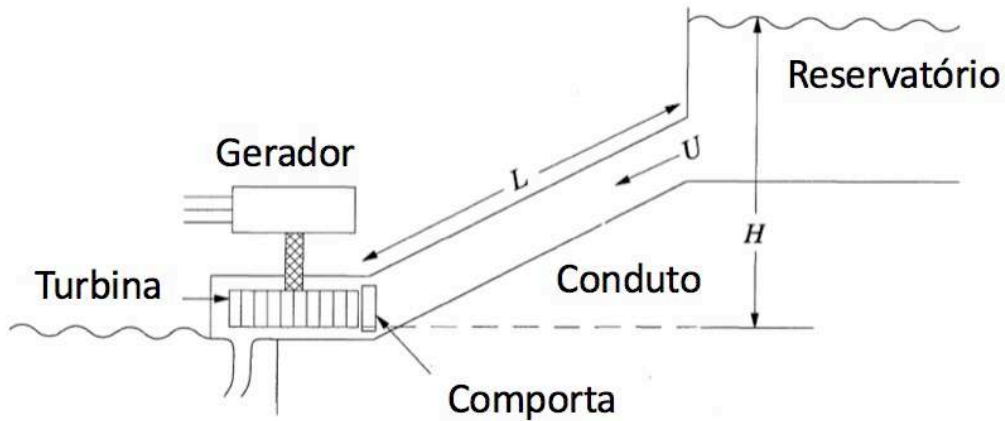


Figura 9 – Esquema de uma hidrelétrica. Fonte: (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

$$U(t) = K_u G(t) \sqrt{H(t)} \quad (34)$$

$$P(t) = K_p H(t) U(t) \quad (35)$$

$$\frac{dU(t)}{dt} = \frac{-a_g}{L} (H(t) - H_0) \quad (36)$$

$$Q(t) = U(t)A \quad (37)$$

Nessas equações, $U(t)$ é a velocidade da água, K_u é a constante de proporcionalidade de velocidade, $G(t)$ é a abertura ideal da comporta, $H(t)$ é a diferença de altura entre a superfície do reservatório até a comporta, $P(t)$ é a potência da turbina, K_p é a constante de proporcionalidade de potência, a_g é a aceleração da gravidade, H_0 é o valor nominal de $H(t)$ considerado, L é o comprimento do conduto e A é a área da seção transversal do conduto.

As equações (34), (35), (36) e (37) são normalizadas ao serem divididas pelo seus valores nominais e, então, são rearranjadas matematicamente. Assim, as equações podem ser reescritas como:

$$\bar{H}(t) = \left(\frac{\bar{U}(t)}{\bar{G}(t)} \right)^2 \quad (38)$$

$$\bar{P}(t) = \bar{U}(t) \bar{H}(t) \quad (39)$$

$$\frac{d\bar{U}(t)}{dt} = -\frac{1}{T_w}(\bar{H}(t) - \bar{H}_0) \quad (40)$$

$$T_w = \frac{LU_r}{a_g H_r} \quad (41)$$

$$\bar{G}(t) = A_t \bar{g}(t) \quad (42)$$

$$A_t = \frac{1}{\bar{g}_{FL} - \bar{g}_{NL}} \quad (43)$$

onde T_w é constante de tempo de inércia da água, A_t é o ganho da turbina, \bar{g}_{FL} é a abertura real com carga nominal e \bar{g}_{NL} é a abertura real sem carga

A potência mecânica pode ser obtida através das equações:

$$\bar{P}_m(t) = \bar{P}(t) - \bar{P}_L(t) \quad (44)$$

$$\bar{P}_L(t) = \bar{U}_{NL} \bar{H}(t) \quad (45)$$

$$\bar{U}_{NL} = A_t \bar{g}_{NL} (\bar{H}_0)^{\frac{1}{2}} \quad (46)$$

onde P_m é a potência mecânica fornecida pela turbina, P_L é a potência dissipada, e \bar{U}_{NL} é a velocidade da água sem carga.

A partir dessas equações, consegue-se montar o diagrama de blocos visto na Figura 10.

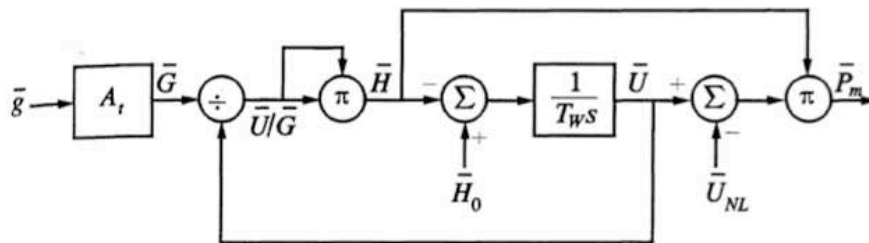


Figura 10 – Diagrama de blocos de uma turbina hidráulica. Fonte: (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

3.3.2 Turbina a vapor

A turbina a vapor apresenta uma variedade de configurações, dependendo do tamanho e das condições do vapor. Essas turbinas podem apresentar um eixo ou mais, unidades em alta pressão, média pressão e baixa pressão, e podem conter reaquecedores (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994). Qualquer turbina a vapor pode ser modelada a partir de um volume de controle genérico, como o representado na Figura 11.

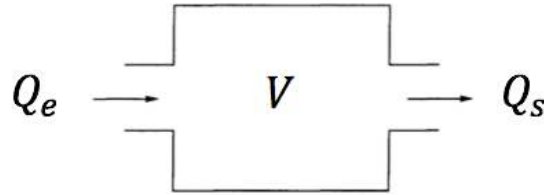


Figura 11 – Volume de controle. Fonte: (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

A equação da continuidade para um volume de controle pode ser escrita como:

$$\frac{dm(t)}{dt} = V \frac{d\rho(t)}{dt} = Q_e(t) - Q_s(t) \quad (47)$$

onde $m(t)$ é a massa dentro do volume de controle, $\rho(t)$ é a massa específica dentro do volume de controle, V é o volume do volume de controle, $Q_e(t)$ é a vazão de entrada e $Q_s(t)$ é a vazão de saída.

Nas turbinas a vapor, o torque e, conseqüentemente, a potência mecânica, são proporcionais a vazão (REPORT, 1973). Assumindo que a vazão que sai do volume de controle é proporcional a pressão do volume de controle:

$$Q_s(t) = \frac{Q_0}{P_0} P(t) \quad (48)$$

onde $P(t)$ é a pressão do volume de controle, P_0 é a pressão nominal e Q_0 é a vazão nominal.

Assumindo que a temperatura é constante dentro do volume de controle:

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = \frac{dP(t)}{dt} \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (49)$$

A partir das equações (47), (48) e (49), chega-se a seguinte expressão:

$$Q_e(t) - Q_s(t) = T_v \frac{dQ_s(t)}{dt} \quad (50)$$

$$T_v = \frac{P_0}{Q_0} V \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (51)$$

onde T_v é a constante de tempo.

A turbina a vapor genérica apresenta diversos volumes de controle que representam os estágios de alta pressão, média pressão, baixa pressão e os realimentadores. Cada um desses estágios é seguido de um ganho que corresponde a fração do torque total produzido pela turbina naquela configuração. A Figura 12 mostra um diagrama de blocos genérico da turbina a vapor.

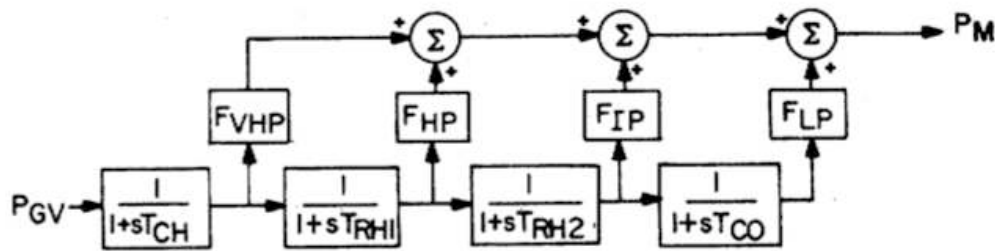


Figura 12 – Diagrama de blocos de uma turbina a vapor genérica. Fonte:(REPORT, 1973)

Nesta figura, P_{GV} é a potência na válvula de entrada, calculada pela multiplicação da pressão do boiler e da vazão na válvula, T_{CH} é a constante de tempo na turbina principal (entre a válvula de controle e o exaustor de muito alta pressão), T_{RH1} é a constante de tempo no primeiro reacondicionador (entre o exaustor de muito alta pressão e o exaustor a alta pressão), T_{RH2} é a constante de tempo no segundo reacondicionador (entre o exaustor de alta pressão e o exaustor a média pressão), T_{CO} é a constante de tempo no *crossover* (entre o exaustor de média pressão e o exaustor a baixa pressão), F_{VHP} , F_{HP} , F_{IP} e F_{LP} são, respectivamente, as frações de potência mecânica produzidas a muito alta pressão, alta pressão, média pressão e baixa pressão.

3.4 Controle do sistema

Nessa seção serão discutidas algumas estratégias de controle para garantir que o sistema mantenha a estabilidade e o sincronismo, com tensão e frequência constantes. Os controladores clássico e Fuzzy são muito utilizados em SEPs com o objetivo de manter o sincronismo com a rede. Para demonstrar a utilização da plataforma desenvolvida, foram implementadas duas estratégias de controle. A primeira envolve o uso de controladores clássicos e a segunda baseada em um controlador Fuzzy conforme em Hoang e Tomsovic (1996). Na sequência, essas estratégias serão detalhadas.

3.4.1 Controle clássico de tensão

Para o controle da tensão do terminal do gerador, uma opção consiste em utilizar um controlador PID no qual o sinal do erro baseia-se na diferença da tensão de referência, a qual se deseja alcançar, e a tensão no terminal. O transdutor é utilizado na malha de

realimentação do sinal da tensão terminal e alguns sinais adicionais, como o PSS, podem ser utilizados como malhas secundárias com o objetivo de melhorar a resposta do sistema.

A estratégia de controle clássica do sistema de excitação consiste em variar a tensão de campo para realizar o controle da tensão da barra terminal. Nos resultados apresentados neste trabalho, foi utilizado o método de sintonia manual para encontrar os valores dos ganhos derivativo, integral e proporcional. O problema de determinação adequada desses ganhos é relevante e poderá ser estudado em outros trabalhos envolvendo a plataforma desenvolvida. A Figura 13 mostra o esquema do controle PID a ser implementado.

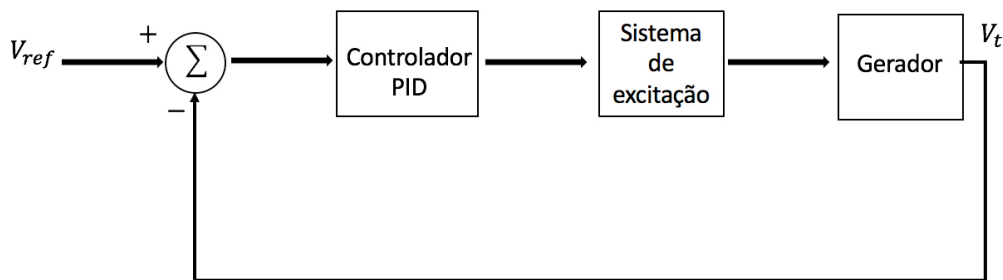


Figura 13 – Diagrama de blocos do controlador PID aplicado ao sistema de excitação. Fonte: o Autor

3.4.2 Controle clássico da frequência

Para o controle de frequência, o controlador PID também foi utilizado na turbina. A estratégia na turbina é utilizar a variação da abertura da comporta que alimenta a turbina com a água, no caso da turbina hidráulica, para conseguir controlar a variação da velocidade angular do eixo que conecta a turbina ao gerador síncrono. A abertura da comporta também depende de um sistema físico em que um servomotor é acionado para abrir e fechar a comporta. O sinal do controlador PID será aplicado no servomotor para abrir e fechar a comporta.

O servomotor é modelado como uma função de transferência com um ganho K_a e uma constante de tempo T_a , onde a entrada é o sinal do controlador e a saída é a velocidade de abertura da comporta. A velocidade tem uma limitação máxima e mínima de abertura, que é representada por uma saturação. O bloco integrador transforma o sinal de velocidade de abertura para a posição da comporta, que também tem um limite máximo e mínimo representado por uma saturação. A Figura 14 mostra o diagrama de blocos que representa o servomotor.

Para este caso, o controlador PID tem como entrada: a diferença entre a potência de referência e a potência elétrica do gerador síncrono e a diferença da velocidade do rotor

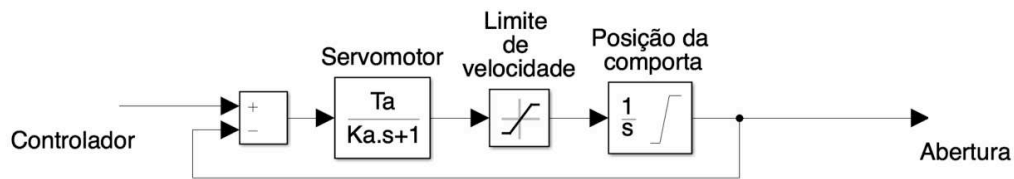


Figura 14 – Diagrama de blocos do servomotor. Fonte: Adaptado de (SRIDHAR; PRASAD, 2014)

e a velocidade síncrona, representada por $\Delta\omega_r$. O R_p é um ganho associado a diferença de potência. A Figura 15 mostra o diagrama de blocos do controlador PID da turbina. O subsistema, chamado de Servomotor, é composto pelo diagrama de blocos da Figura 14.

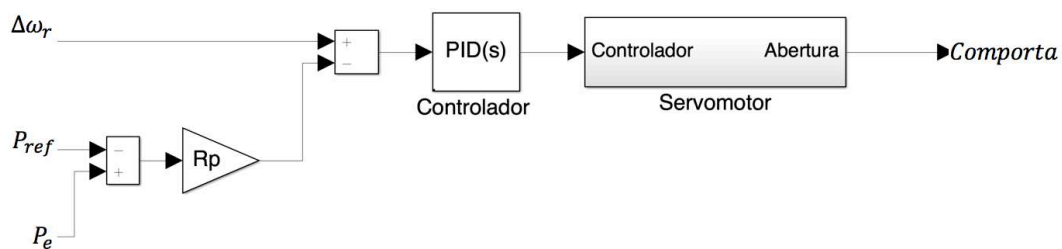


Figura 15 – Controlador PID aplicado na turbina hidráulica. Fonte: Adaptado de (SRIDHAR; PRASAD, 2014)

3.4.3 Controle moderno da frequência

O controlador Fuzzy também será avaliado para o controle da frequência. A Figura 16 mostra o diagrama de blocos do controlador Fuzzy implementado no *software Matlab/Simulink*. As entradas do controlador serão a variação da velocidade angular do eixo do rotor e a variação da aceleração angular do eixo do rotor. As constantes $K\omega_r$, $K\dot{\omega}_r$ e K são as constantes do controlador Fuzzy. As constantes também foram encontradas por sintonia manual, partindo dos valores de referência utilizados em Hoang e Tomsovic (1996).

Para cada uma das duas entradas, há um conjunto de funções de pertinência e um terceiro conjunto de funções de pertinência para a saída. Cada conjunto de funções de pertinência variam de $[-1, 1]$ e são compostos de 5 funções de pertinência triangulares e 2 funções de pertinência trapezoidais.

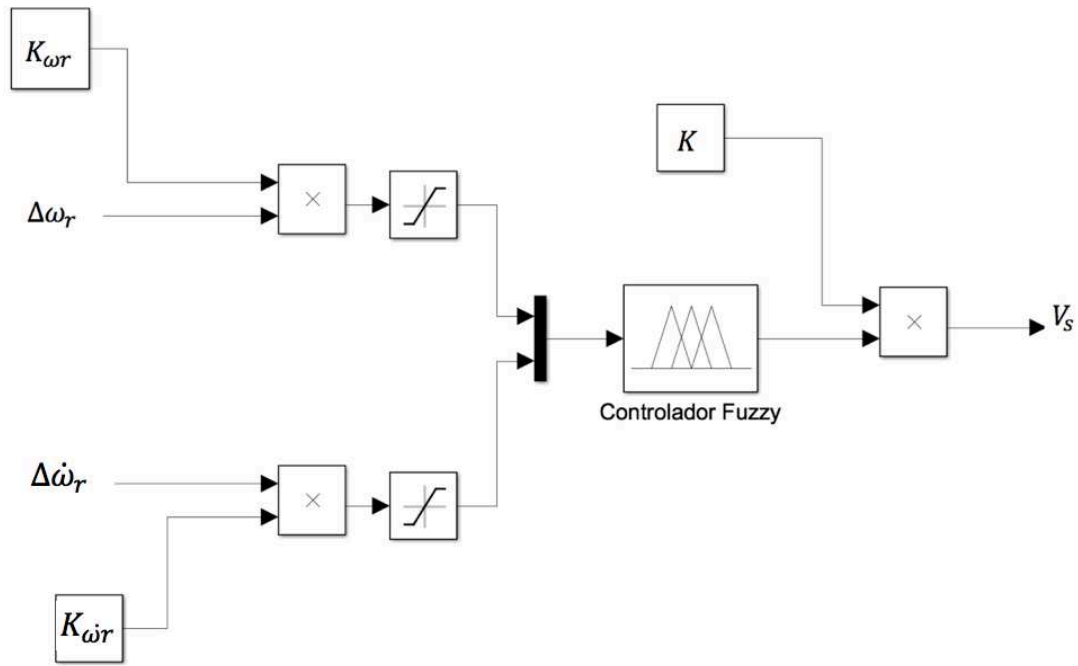


Figura 16 – Diagrama de blocos do controlador Fuzzy. Fonte: Adaptado de (HOANG; TOMSOVIC, 1996)

O método Mamdani foi utilizado para determinar as regras de inferência em que as regras são do tipo "se x é A e y é B , então, z é C " (SIMOES; SHAW, 2007). O controlador utilizado contabiliza 49 regras e a defuzzificação é realizada pelo método do centróide através da equação 52.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{Ri}(\Delta\dot{\omega}_r; \Delta\omega_r) u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{Ri}(\Delta\dot{\omega}_r; \Delta\omega_r)} \quad (52)$$

Onde $\mu_{Ri}(\Delta\dot{\omega}_r; \Delta\omega_r)$ é a área de uma função de pertinência, u_i é a posição do centróide de uma função de pertinência individual e u é o valor de saída Fuzzy.

3.5 Perturbação do sistema

O sistema elétrico de potência pode estar exposto a diferentes tipos de perturbações durante a operação. O curto-circuito trifásico na barra terminal do gerador é um dos principais tipos de perturbação que pode acontecer (MATA, 2005). Para efeitos de simulação, a falta trifásica será realizada fazendo a tensão do terminal igual a zero durante o tempo de falta.

3.6 Implementação da plataforma

O principal objetivo desse trabalho é a implementação de uma plataforma digital que contenha os principais componentes de um sistema de geração dentro do sistema

elétrico de potência. Na sequência, serão detalhadas as formas de implementação desses componentes no *software Matlab/Simulink*.

3.6.1 Modelo do gerador síncrono

A partir do modelo construído através das equações da subseção 3.1, o diagrama de blocos foi implementado dentro do *Simulink*. A Figura 17 mostra esta implementação. O modelo tem duas entradas que são a potência mecânica $P_m(t)$, obtida através da turbina a ser acoplada ao gerador, e a tensão de campo $E_{fd}(t)$, que é obtida através do sistema de excitação. As saídas do modelo são as condições de operação $V_t(t)$, que é tensão na barra terminal do gerador, $P_t(t)$, que é a potência ativa fornecida pelo gerador, $Q_t(t)$, que é a potência reativa fornecida pelo gerador, e o $\delta(t)$, que é o ângulo do rotor. A potência elétrica do gerador corresponde a $P_e(t)$ e $\Delta\omega_r(t)$ é a diferença da velocidade síncrona e da velocidade do rotor, devendo ser o mais próximo possível de zero, e são parâmetros utilizados para o controle do sistema.

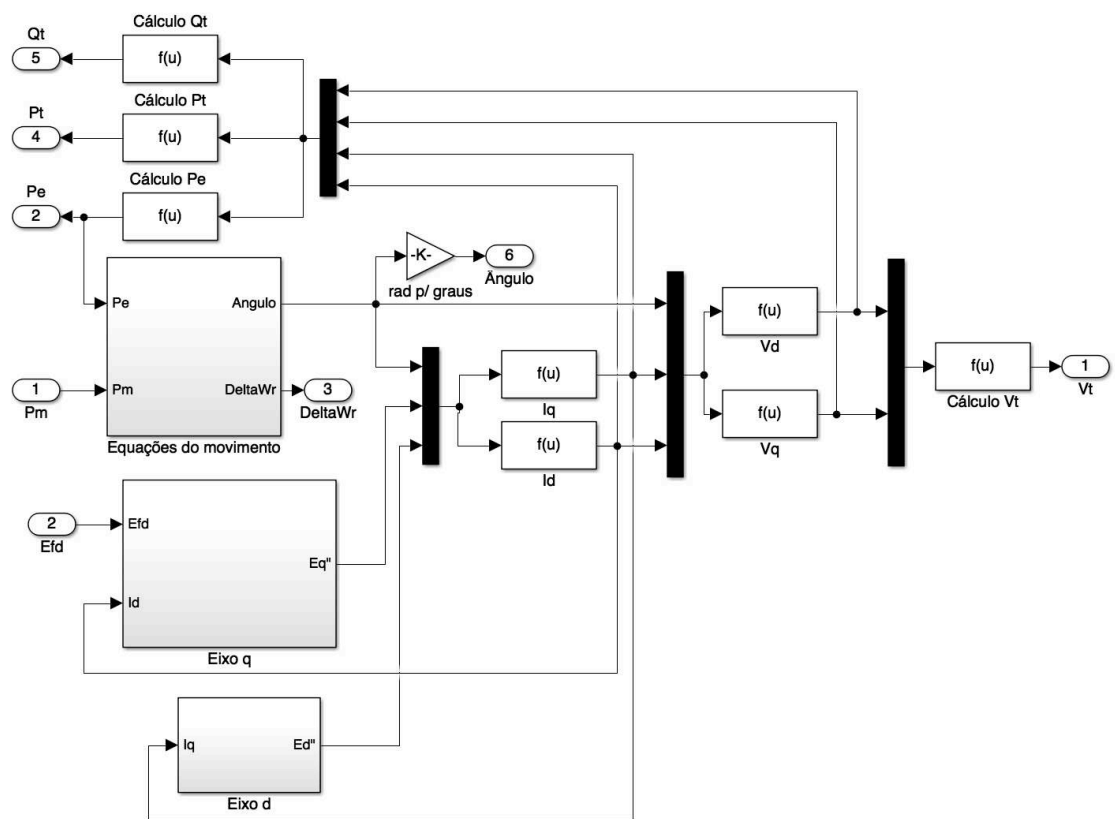
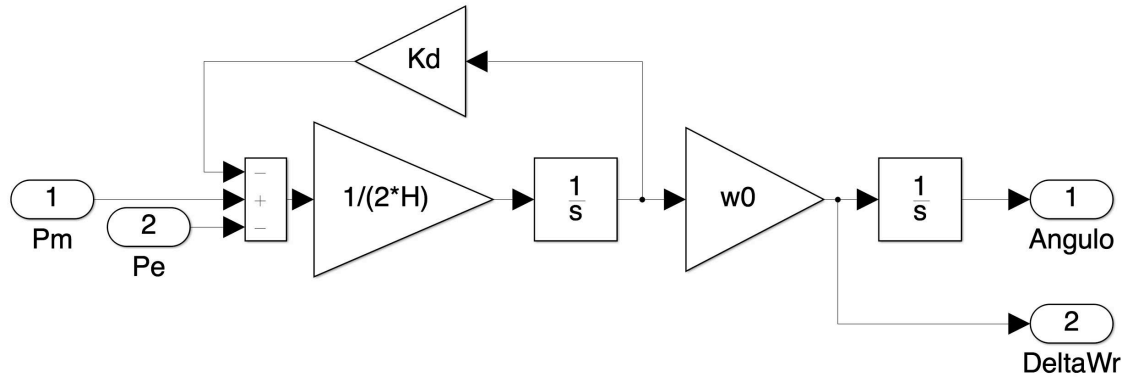


Figura 17 – Modelo do gerador implementado. Fonte: o Autor

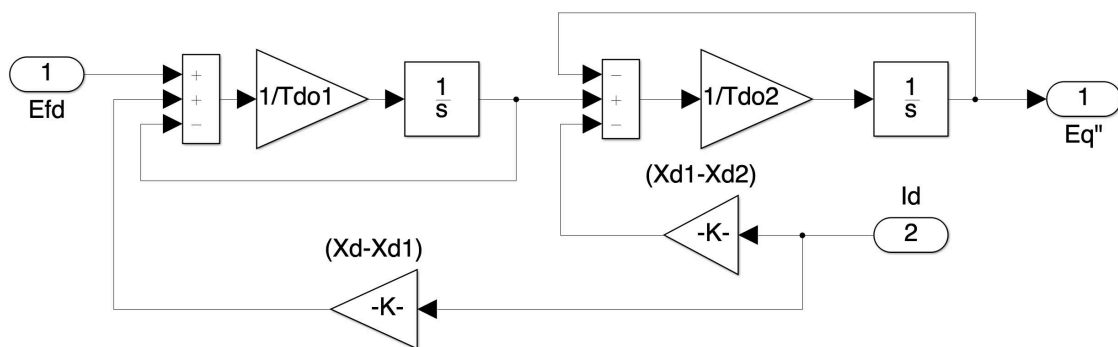
Na Figura 17, no bloco Cálculo Q_t foi implementada a equação (16), no bloco Cálculo P_t a equação (15) e no bloco Cálculo P_e a equação (14). As equações efetuadas nos blocos I_q e I_d são (12) e (13). Para os blocos V_d e V_q foram implementadas as

equações (7) e (8) onde $V_d(t)$ e $V_q(t)$ foram matematicamente isoladas. Para o bloco Cálculo V_t foi realizada a equação (9).

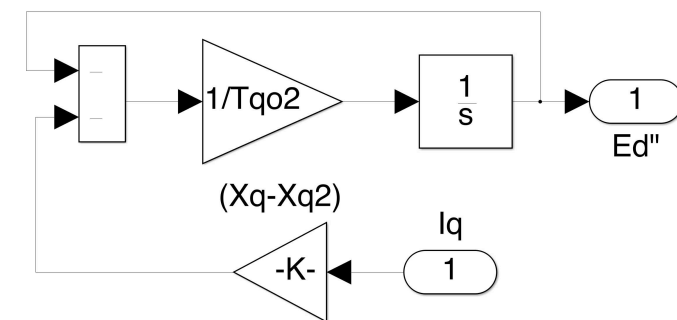
As equações diferenciais que fazem parte do modelo do gerador síncrono estão implementadas nos subsistemas "Equações do movimento", "Eixo q" e "Eixo d" na Figura 17. A Figura 18 mostra a expansão desses três subsistemas.



(a) Equações do movimento



(b) Eixo de quadratura do gerador



(c) Eixo direto do gerador

Figura 18 – Detalhes do modelo do gerador. Fonte: o Autor

Como os parâmetros se repetem muitas vezes dentro do modelo do gerador síncrono e o objetivo do trabalho consiste em elaborar uma plataforma que facilite futuras simulações, o modelo foi embutido em uma máscara para que a troca dos parâmetros fique mais fácil de ser feita. A Figura 19 mostra os detalhes da máscara para o gerador

implementado. Ao clicar duas vezes em cima da máscara do gerador, representando pela Figura 19(a), abre-se a janela dos parâmetros do gerador, representada na Figura 19(b). A realização da troca dos valores numéricos dos parâmetros do gerador se dá nessa janela, tornando o processo de substituição dos parâmetros em futuras simulações que serão feitas muito mais fáceis de serem realizadas pelo usuário.

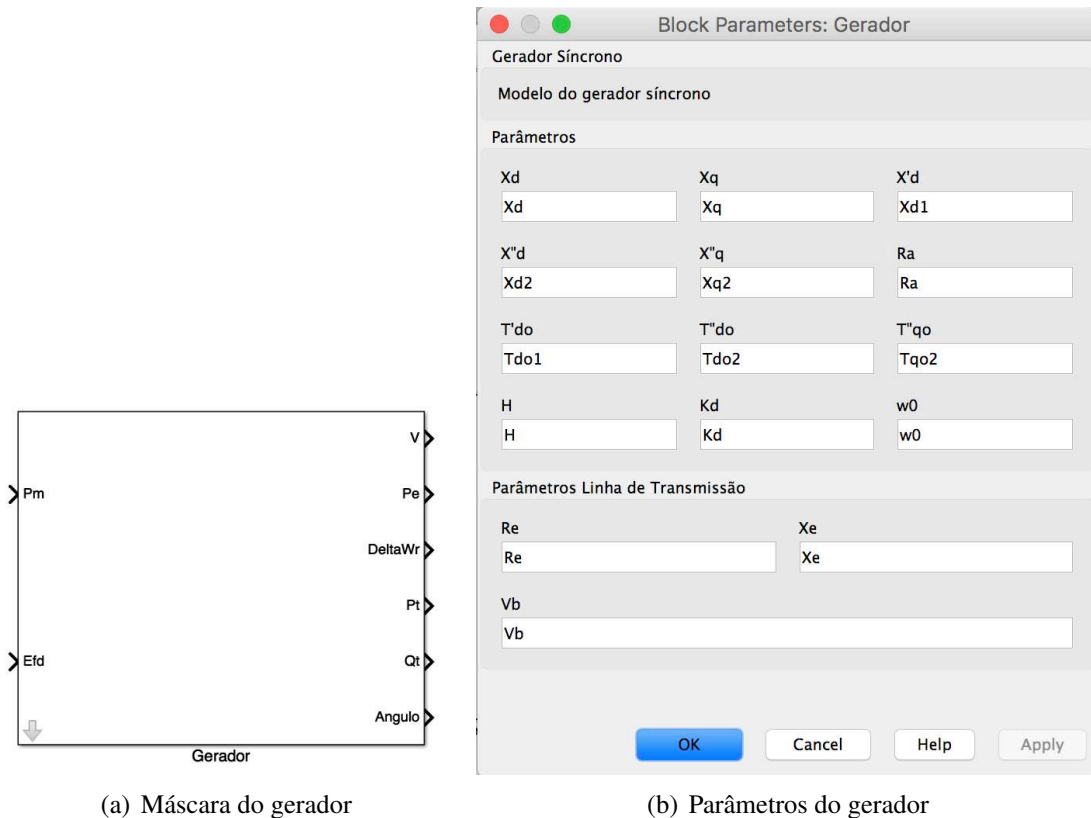


Figura 19 – Detalhes do modelo implementado do gerador. Fonte: o Autor

3.6.2 Modelos dos sistemas de excitação

O primeiro sistema de excitação que foi implementado foi o DC1A, descrito em Kundur, Balu e Lauby (1994). Esse modelo representa os excitadores de um comutador CC controlados por campo, com reguladores de tensão atuando continuamente e é composto por um amplificador e uma excitatriz de corrente contínua, ambos modelados na subseção 3.2. A Figura 20 mostra o modelo implementado no *software Matlab/Simulink*.

O modelo foi embutido uma máscara, como mostra a Figura 21(a), de forma que a troca dos valores numéricos dos parâmetros fique mais acessível de ser feita. Ao clicar duas vezes em cima da máscara do sistema de excitação DC1A, representado na Figura 21(a), abre-se a janela dos parâmetros do modelo, representado na Figura 21(b). A realização da troca dos parâmetros do sistema se dá nessa janela.

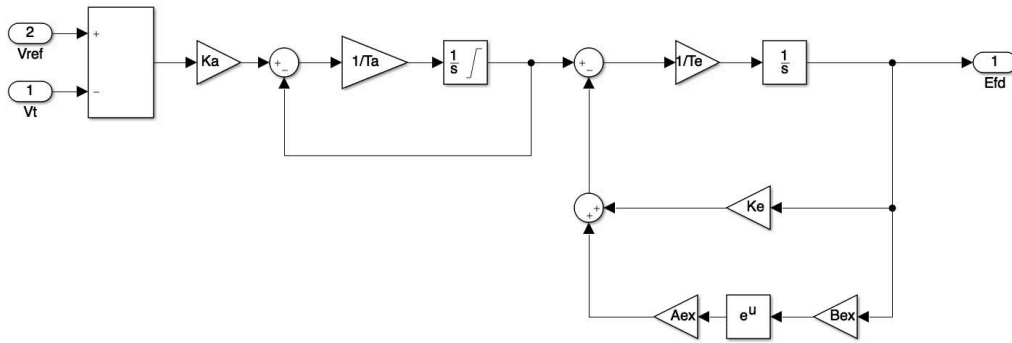


Figura 20 – Modelo implementado para o sistema de excitação DC1A. Fonte: adaptado de (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

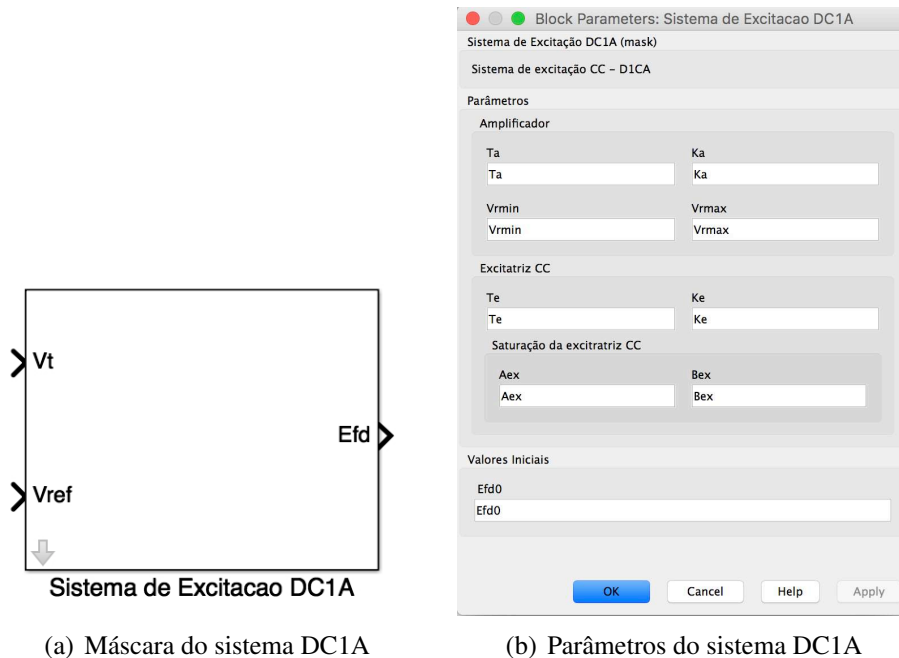
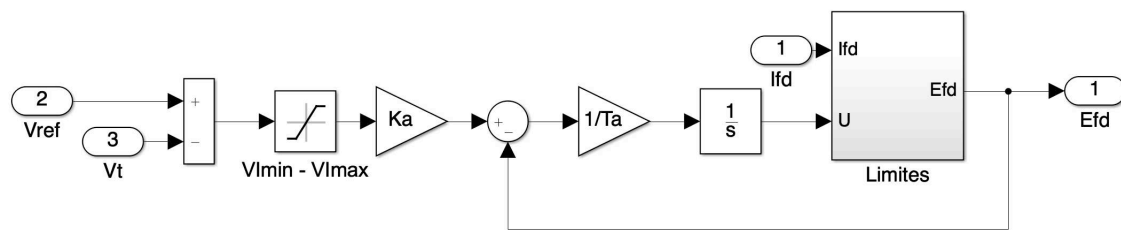


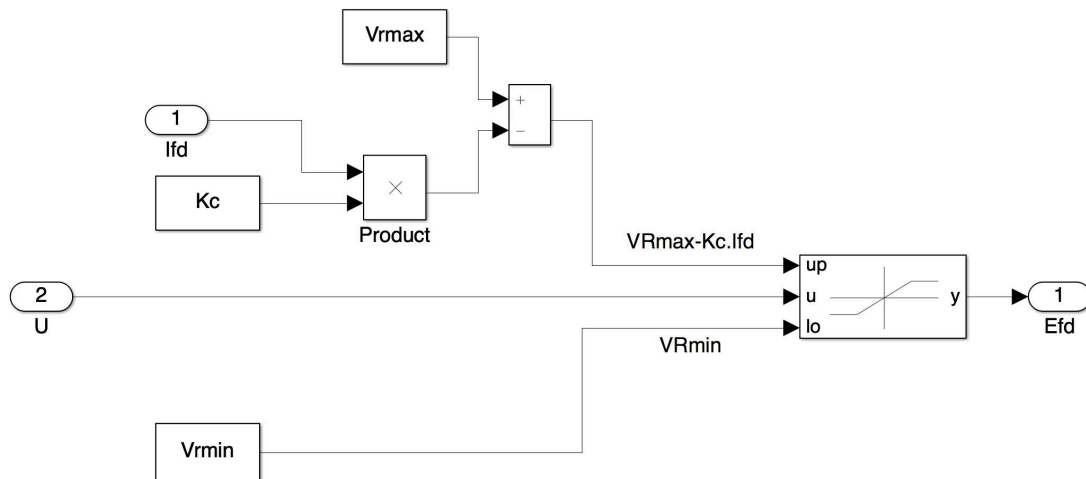
Figura 21 – Detalhes do modelo implementado para o sistema de excitação DC1A. Fonte: o Autor

O segundo modelo implementado foi o AC4A, apresentado em Kundur, Balu e Lauby (1994). Este bloco modela um alternador CA conectado a um retificador de tiristores para produzir a tensão de campo requerida pelo bloco da máquina síncrona e é composto por um amplificador e limitações de tensão. A Figura 22(a) mostra o diagrama de blocos implementado, enquanto a Figura 22(b) mostra a implementação dos limites de tensão na saída.

O modelo foi embutido uma máscara, como mostra a Figura 23(a). A realização da troca dos valores numéricos dos parâmetros do modelo é realizada pela interface vista na Figura 23(b).

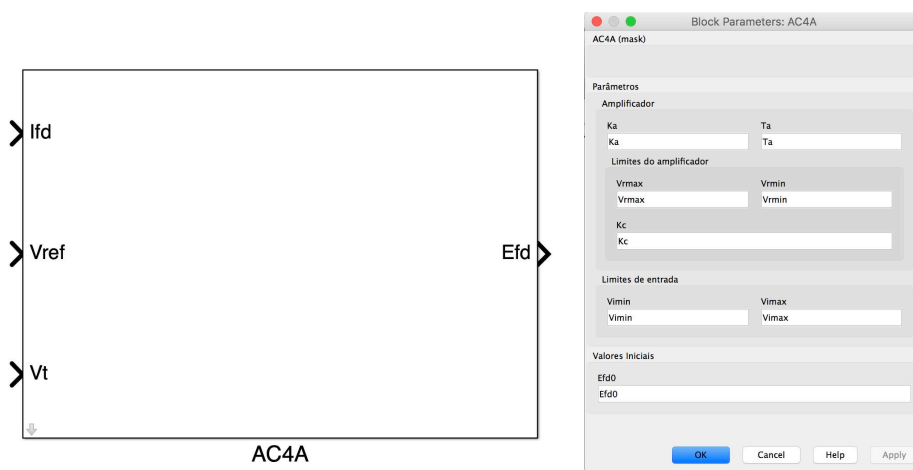


(a) Modelo implementado AC4A



(b) Implementação da limitação do modelo AC4A

Figura 22 – Modelo implementado para o sistema de excitação AC4A. Fonte: o Autor



(a) Máscara do sistema AC4A

(b) Parâmetros do sistema AC4A

Figura 23 – Detalhes do modelo implementado para o sistema de excitação AC4A. Fonte: o Autor

O terceiro modelo implementado foi o ST1A, visto em [Kundur, Balu e Lauby \(1994\)](#). Este bloco modela sistema de excitação de tiristores com alimentação de barramento e é composto por um amplificador e limitações de tensão. A Figura 24 mostra o diagrama de blocos implementado.

O diagrama foi embutido uma máscara, como mostra a Figura 25(a). Também

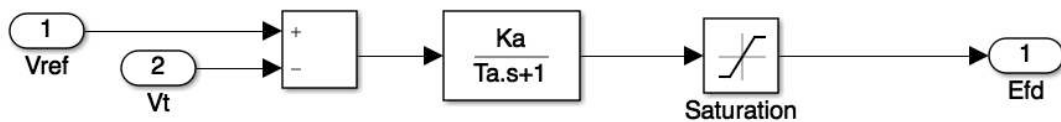


Figura 24 – Modelo implementado para o sistema de excitação ST1A. Fonte: o Autor

nesse modelo, ao clicar duas vezes em cima da máscara do sistema abre-se a janela de entrada dos parâmetros, conforme visto na Figura 25(b).

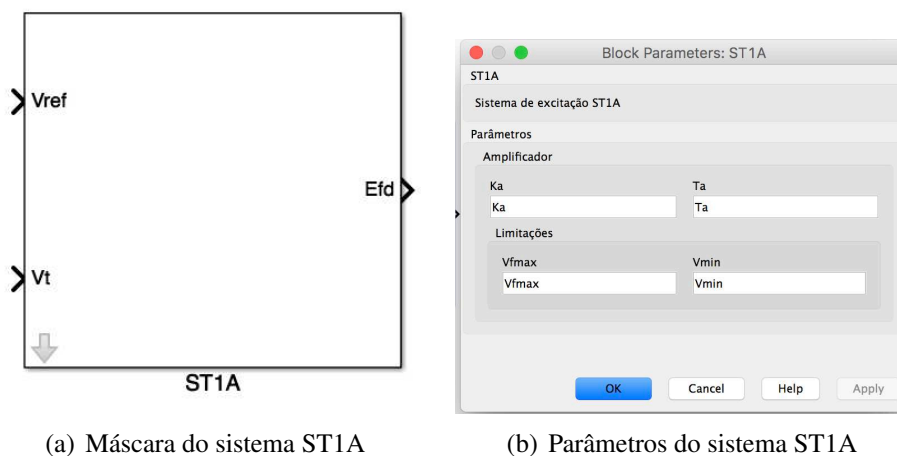


Figura 25 – Detalhes do modelo implementado para o sistema de excitação ST1A. Fonte: o Autor

O transdutor também foi implementado e a Figura 26 mostra a função de transferência que representa o comportamento dinâmico desse componente.

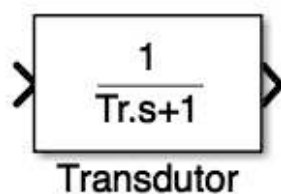


Figura 26 – Modelo implementado do transdutor. Fonte: o Autor

3.6.3 Turbinas

O primeiro modelo de turbina que foi implementado no *software* Matlab/Simulink é o que representa a turbina hidráulica. A Figura 27 mostra o diagrama de blocos realizado. O diagrama foi embutido numa máscara, como mostra a Figura 28(a). Ao clicar

duas vezes em cima da máscara da turbina hidráulica, abre-se a janela dos parâmetros do modelo, vista na Figura 28(b).

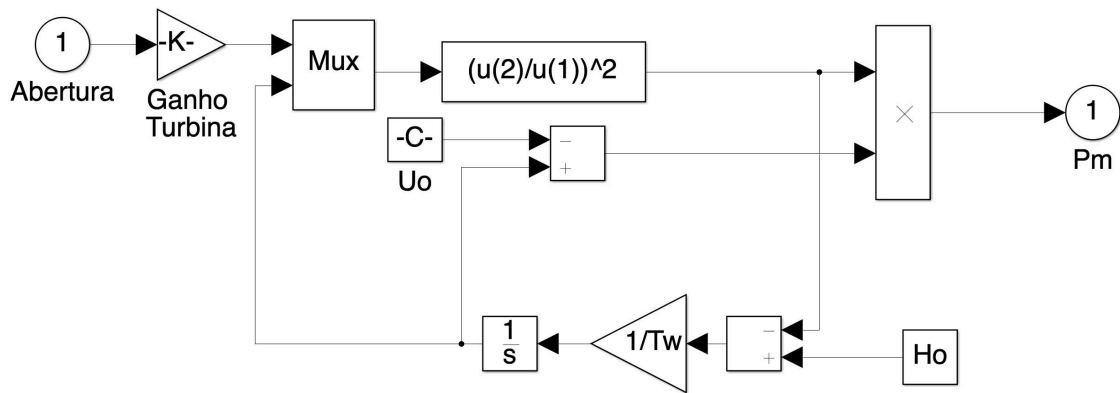
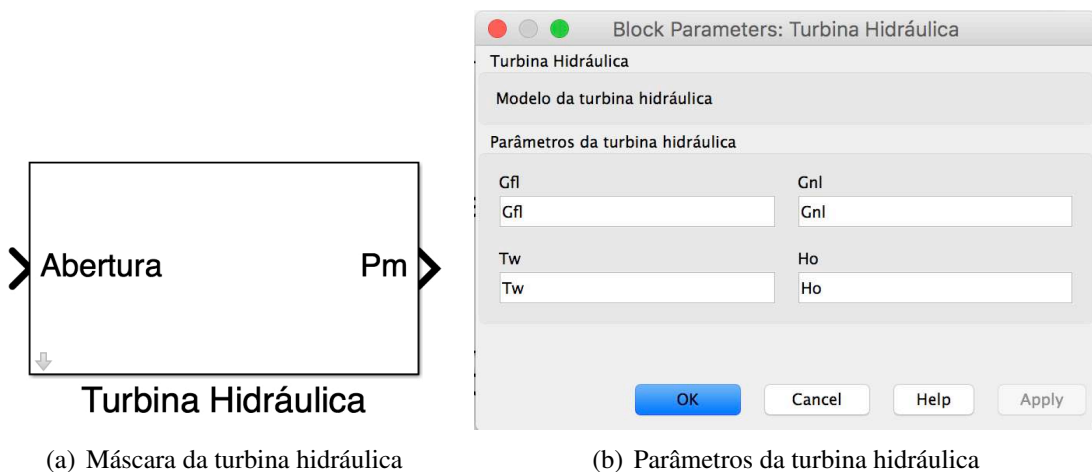


Figura 27 – Modelo implementado para a turbina hidráulica. Fonte: o Autor



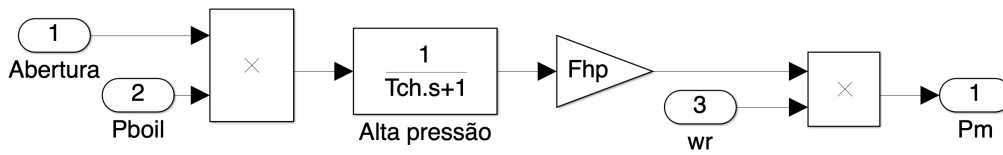
(a) Máscara da turbina hidráulica

(b) Parâmetros da turbina hidráulica

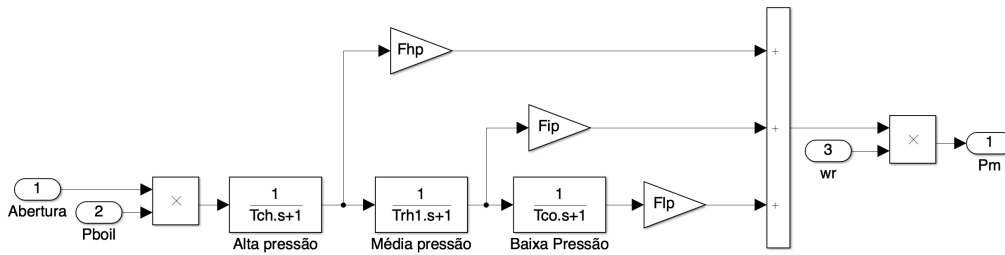
Figura 28 – Detalhes do modelo implementado para a turbina hidráulica. Fonte: o Autor

Para a turbina a vapor, foram implementados três modelos diferentes. O primeiro modelo é o mais simples e representa a turbina sem reaquecedores. A Figura 29(a) mostra o diagrama implementado. O segundo modelo (Figura 29(b)) representa a turbina com um reaquecedor. Por fim, o terceiro modelo (Figura 29(c)) representa a turbina com dois reaquecedores.

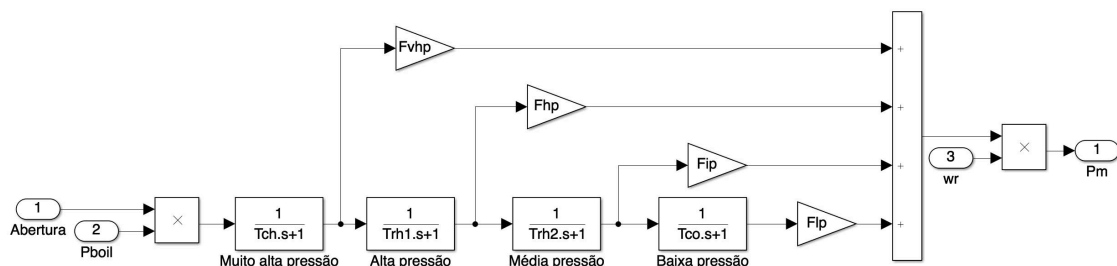
Todos os três diagramas das turbinas a vapor foram embutidos em uma máscara igual a mostrada Figura 30. Ao clicar duas vezes em cima da máscara da turbina a vapor, abre-se a janela dos parâmetros dos modelos representados na Figura 31. Os padrões são modificados a partir da configuração desejada.



(a) Sem reaquecedor



(b) Com um reaquecedor



(c) Com dois reaquecedores

Figura 29 – Diagramas implementados para as turbinas a vapor. Fonte: o Autor

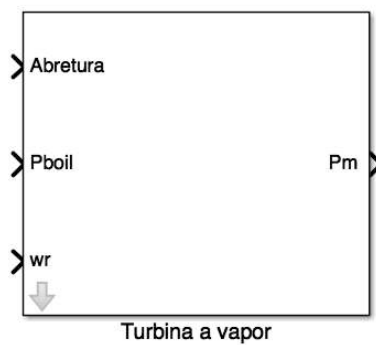
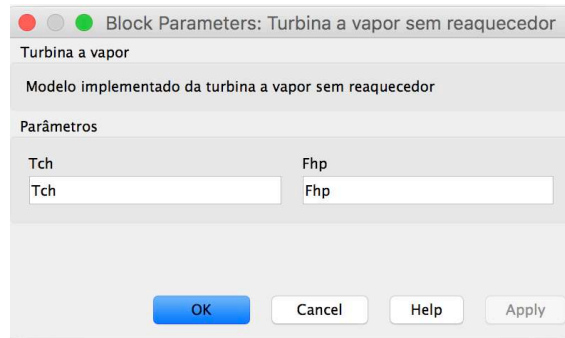
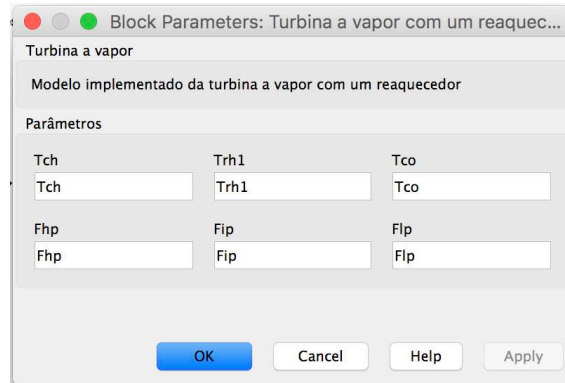


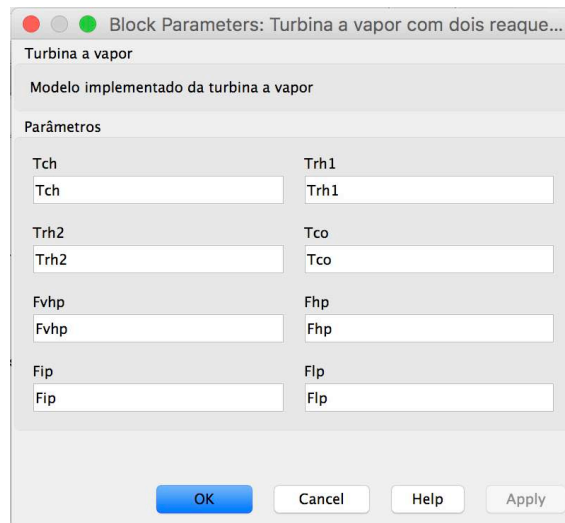
Figura 30 – Máscara de uma turbina a vapor. Fonte: o Autor



(a) Parâmetros da turbina sem reaquecedor



(b) Parâmetros da turbina com um reaquecedor



(c) Parâmetros da turbina com dois reaquecedores

Figura 31 – Parâmetros para as turbinas a vapor. Fonte: o Autor

4 Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com as propostas desenvolvidas na sessão anterior. Será realizada também a discussão destes resultados.

4.1 Simulação em malha aberta

Os modelos implementados no *software Matlab/Simulink* foram simulados em malha aberta em determinadas condições para a análise dos mesmos.

4.1.1 Gerador síncrono em malha aberta

O gerador implementado foi simulado em regime permanente desconsiderando qualquer perturbação no sistema. A partir das condições iniciais, pode-se simular o sistema em regime permanente. Os valores escolhidos para os parâmetros fixos do gerador síncrono para esse teste constam na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do gerador.

Parâmetros	Valor
X_d	1,445 pu
X_q	0,959 pu
X_d'	0,316 pu
X_d''	0,179 pu
X_q''	0,162 pu
R_a	0,001 pu
R_e	0,02 pu
X_e	0,415 pu
T'_{do}	5,256 s
T''_{do}	0,0282 s
T''_{qo}	0,157 s
H	4,27 pu
K_d	0 pu

Fonte: (COSTA et al., 2003)

Para a simulação foram escolhidos quatro diferentes condições de operação em regime permanente para o gerador síncrono, descritas na Tabela 2. Essas condições de operação foram utilizadas para encontrar as condições iniciais do gerador conforme as equações matemáticas expostas na subseção 3.1

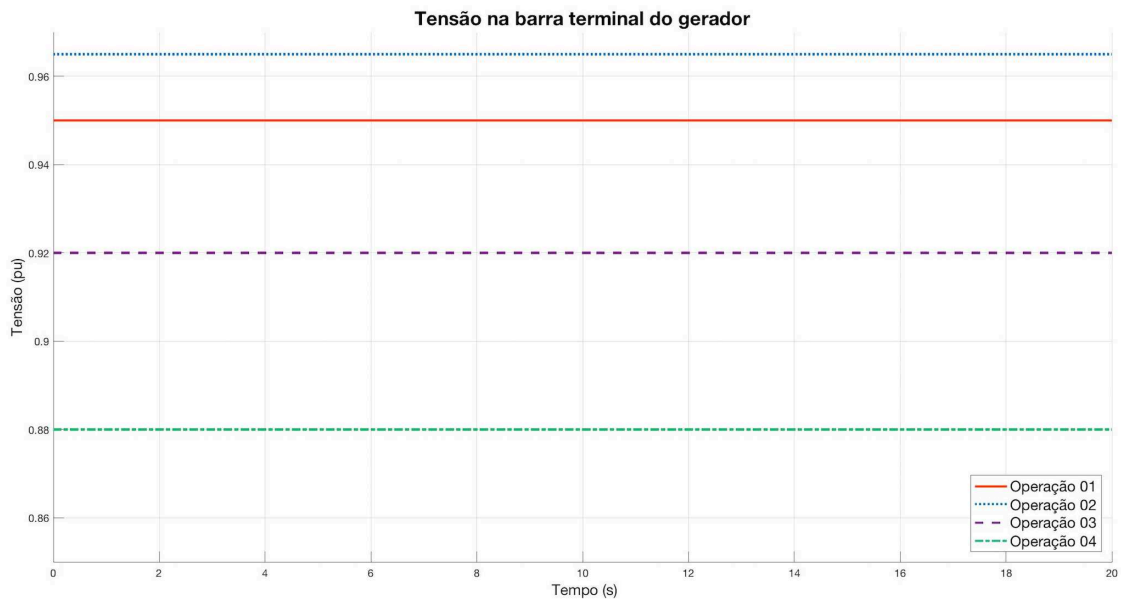
Tabela 2 – Condições de operação do gerador

Condições de operação	P_t	Q_t	V_t
01	0,8 pu	0,2 pu	0,95 pu
02	0,85 pu	0,1 pu	0,965 pu
03	0,9 pu	0,15 pu	0,92 pu
04	0,87 pu	0,22 pu	0,88 pu

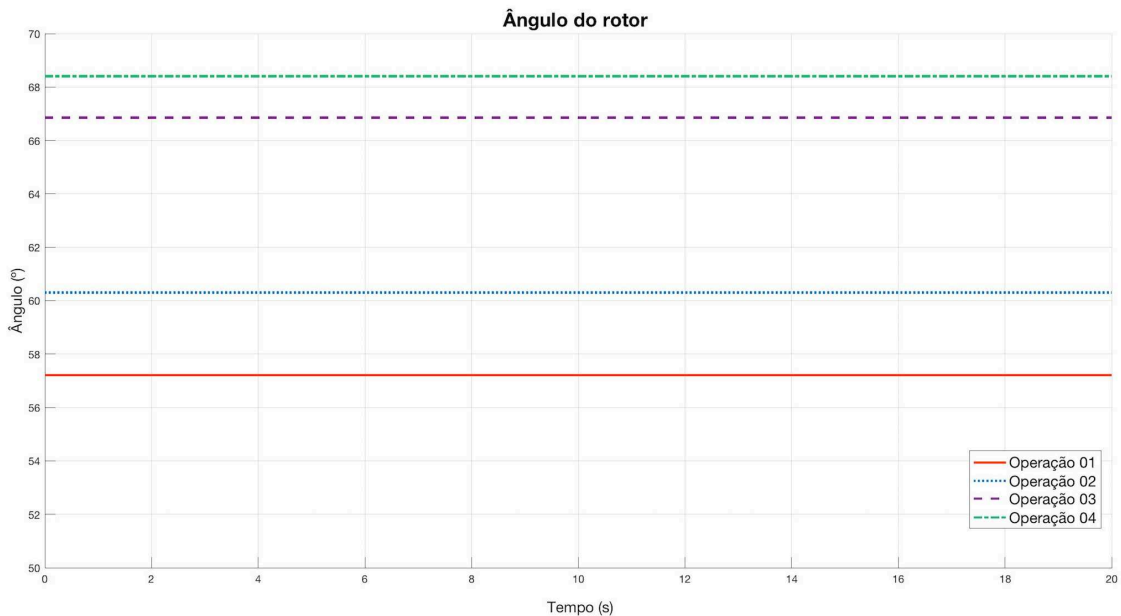
Fonte: o Autor

A Figura 32 mostra os valores da tensão na barra terminal do gerador, na Figura 32(a), e o ângulo do rotor, na Figura 32(b), durante a simulação em regime permanente

do bloco.



(a) Tensão da barra terminal do gerador

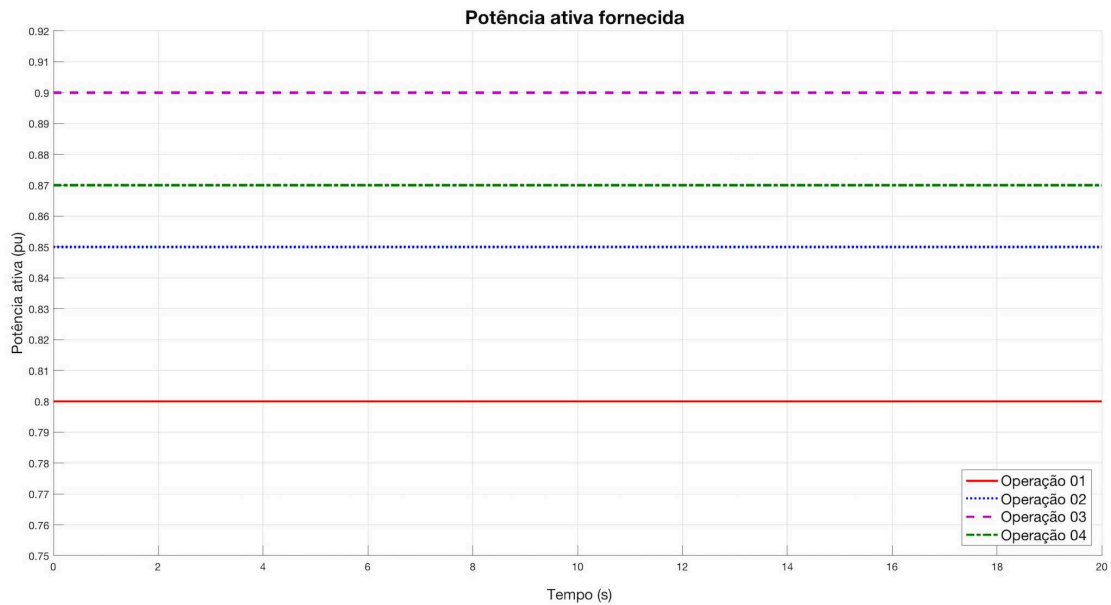


(b) Ângulo do rotor

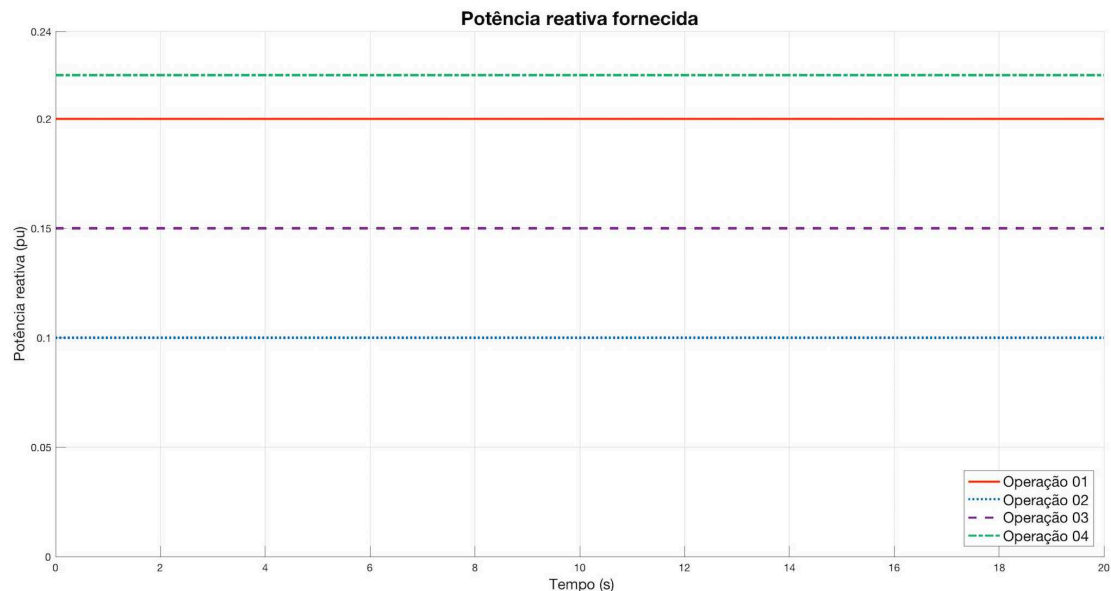
Figura 32 – Resposta em regime permanente para as condições de operação da tabela 2. Fonte: o Autor

A Figura 33 mostra os valores da potência ativa fornecida pelo gerador, na Figura 33(a), e a potência reativa fornecida pelo gerador, na Figura 33(b), durante a simulação em regime permanente para todas as quatro condições de operação testadas.

Analisando as Figuras 32 e 33, pode-se dizer que o modelo consegue simular as respostas em regime permanente e reproduzir os valores esperados para o gerador síncrono. Este é um indicativo que o modelo e o diagrama de blocos implementado no software *Matlab/Simulink* segue adequadamente as tendências do sistema real.



(a) Potência ativa fornecida pelo gerador



(b) Potência reativa fornecida pelo gerador

Figura 33 – Resposta em regime permanente para as condições de operação da tabela 2. Fonte: o Autor

A simulação também mostra a capacidade do modelo implementado para o gerador síncrono manter a tensão e frequência constantes em regime permanente sem nenhuma perturbação de qualquer tipo. Essa constância das condições de operação para a frequência e para a tensão são requisitos importantes na geração de energia elétrica para garantir a qualidade da energia fornecida.

4.1.2 Sistemas de excitação em malha aberta

Os sistemas de excitação implementados também foram simulados em malha aberta para se analisar as respostas de simulação e conseguir verificar se são coerentes.

Os parâmetros do sistema DC1A constam na tabela 3, os parâmetros do sistema AC4A na tabela 4, e os parâmetros do sistema ST1A na tabela 5.

Tabela 3 – Parâmetros do sistema de excitação D1CA

DC1A	
Parâmetros	Valor
K_e	0,05 pu
T_e	1,15 s
A_{EX}	0,014 pu
B_{EX}	1,55 pu
K_a	187 pu
T_a	0,89 s
V_{RMIN}	-1,7 pu
V_{RMAX}	1,7 pu

Fonte: (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

Tabela 4 – Parâmetros do sistema de excitação AC4A

AC4A	
Parâmetros	Valor
K_a	200 pu
T_a	0,04 s
V_{rmin}	-4,53 pu
V_{rmax}	5,64 pu
K_c	0 pu
V_{imin}	-1,0 pu
V_{imax}	1,0 pu

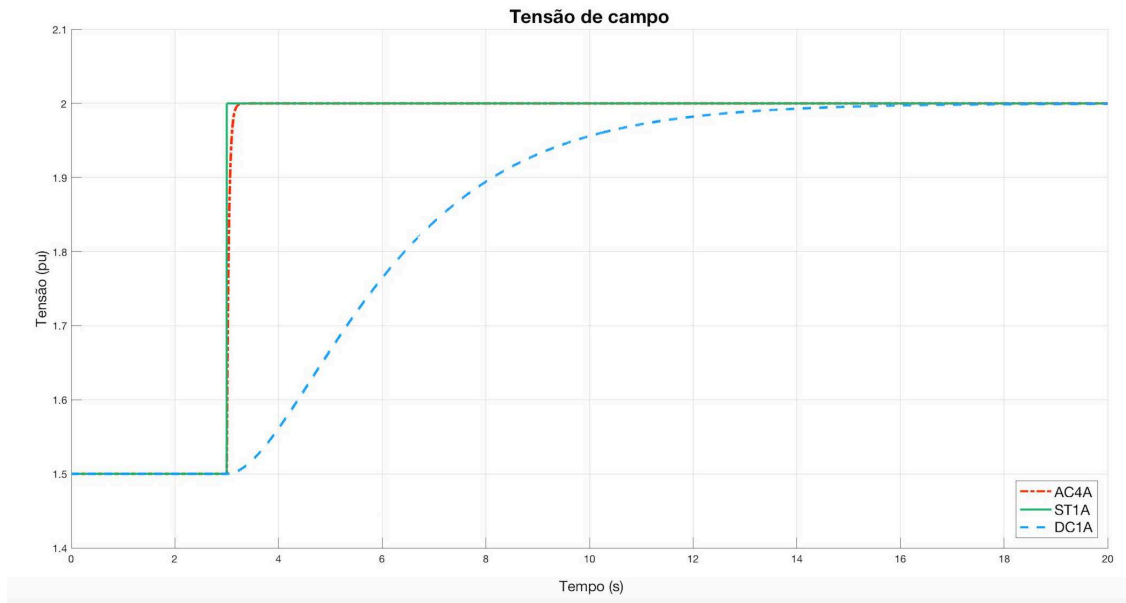
Fonte: (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

Tabela 5 – Parâmetros do sistema de excitação ST1A

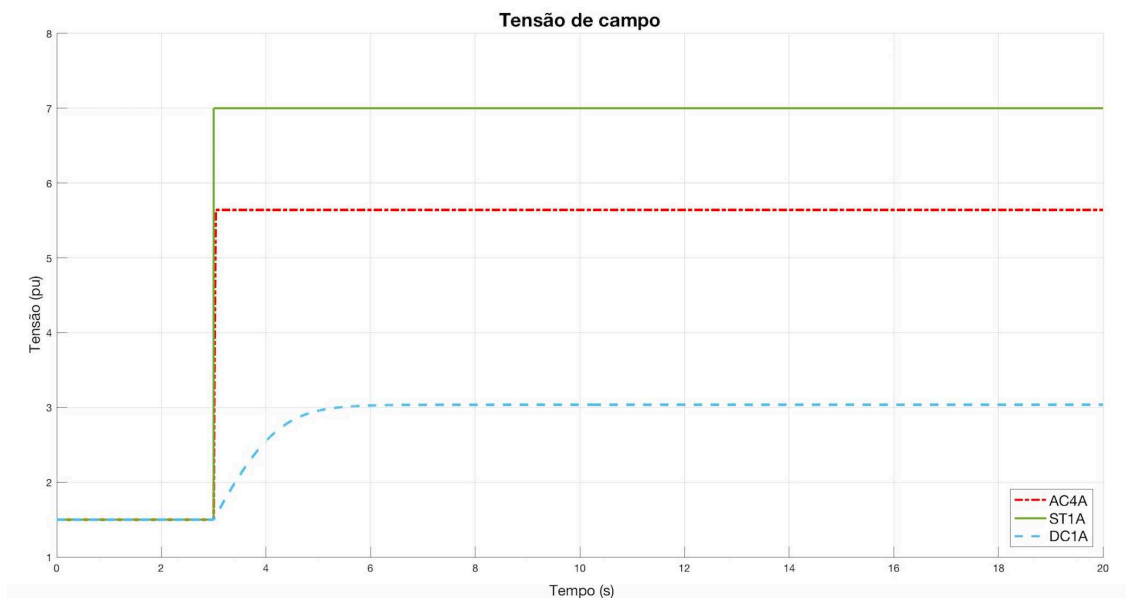
ST1A	
Parâmetros	Valor
K_a	200 pu
T_a	0 s
V_{fmin}	-6,4 pu
V_{fmax}	7 pu

Fonte: (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

Para a validação dos sistemas de excitação foram feitos dois testes. Para ambos, cada sistema inicia com uma condição de tensão de campo na saída E_{fd} no valor de 1,5 pu. No primeiro caso, há um degrau na referência em que o novo valor de tensão de campo na saída é de 2,0 pu. Já no segundo caso, o degrau eleva a referência de tensão na saída para 8,0 pu.



(a) Variação da referência de 1,5 para 2,0 pu



(b) Variação da referência de 1,5 para 8,0 pu

Figura 34 – Resposta dos sistemas de excitação a um degrau. Fonte: o Autor

Nota-se que, para os dois casos, o valor inicial se mantém constante até existir uma mudança no valor de referência, no caso um degrau na entrada do sistema de excitação. Percebe-se no primeiro caso, na Figura 34(a), os três sistemas de excitação alcançam a tensão de campo requerida na saída do sistema. No entanto, a resposta de cada um é diferente. O sistema de excitação DC1A tem um tempo de subida maior que os outros dois sistemas de excitação simulados. Por outro lado, o sistema de excitação AC4A tem um tempo de subida quase instantâneo, igual ao sistema de excitação ST1A.

Para o segundo caso, na Figura 34(b), nota-se que os valores não chegam a atingir o valor estipulado pelo degrau na entrada. Esse tipo de resposta acontece porque nos modelos

simulados foram levados em conta alguns limites de tensão na saída do amplificador e/ou no sistema de excitação. Logo, o motivo para os sistemas não conseguirem chegar até o valor estipulado se deve a atuação desses limites e é um indicativo que o sistema está funcionando conforme especificado durante a implementação dos modelos.

4.1.3 Turbinas em malha aberta

As turbinas hidráulica e todas as configurações da turbina a vapor implementadas também foram testados em malha aberta para se analisar as respostas da simulação. Os parâmetros utilizados para a turbina hidráulica estão na tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros da turbina hidráulica

Parâmetros	Valor
H_0	1 pu
T_w	1,41 s
g_{nl}	0,06 pu
g_{fl}	0,96 pu

Fonte: (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994)

Para a turbina a vapor, foram testados três tipos diferentes de configuração. A primeira configuração utilizada foi a mais simples possível, que é uma turbina a vapor sem realimentação, ou seja, sem reaquecedor, e com apenas um estágio. A segunda configuração de turbina apresenta uma realimentação enquanto a terceira apresenta dois reaquecedores. A tabela 7 mostra os valores dos parâmetros para cada configuração que será simulada.

Tabela 7 – Parâmetros da turbina a vapor

Tipo de turbina	F_{vhp}	F_{hp}	F_{ip}	F_{lp}	T_{ch}	T_{rh1}	T_{rh2}	T_{co}
Sem reaquecedor	—	1	—	—	0,2	—	—	—
Com um reaquecedor	—	0,3	0,4	0,3	0,2	7	—	0,3
Com dois reaquecedores	0,22	0,22	0,3	0,26	0,2	7	7	0,3

Fonte: (REPORT, 1973)

As turbinas foram simuladas em uma situação na qual, ao longo do tempo, o valor da potência mecânica a ser fornecida para o gerador muda através de um degrau, ou seja, uma variação na abertura da comporta. O valor do degrau foi ajustado para estabelecer o mesmo nível de potência de saída. A Figura 35 mostra a resposta de cada turbina ao longo do tempo simulado. Nota-se que todas as turbinas, hidráulica ou qualquer configuração da turbina a vapor, conseguem chegar ao valor final requerido pelo gerador.

A turbina hidráulica apresenta um comportamento diferente das demais pois, quando há uma variação na abertura da comporta que alimenta a turbina, primeiro se

tem uma variação brusca e muito rápida na potência para depois seguir ao valor que se deseja. Já para as turbinas a vapor, percebe-se que o tempo de subida aumenta quando a configuração da turbina se torna mais complexa com o aumento do número de reaqueueadores.

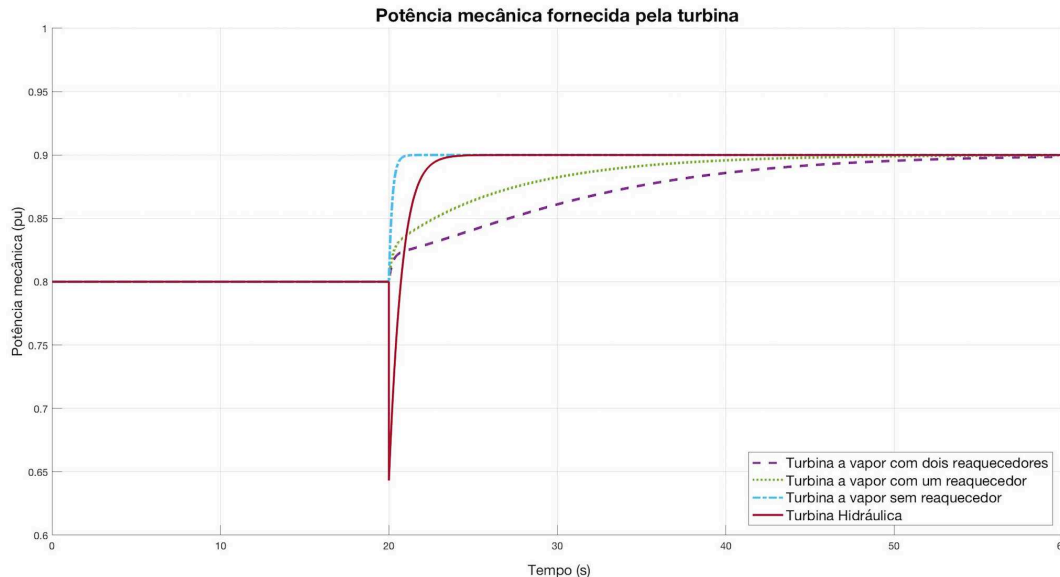


Figura 35 – Resposta das turbinas implementadas a uma variação do referencial. Fonte: o Autor

4.2 Simulação de uma perturbação

Uma das principais perturbações que pode atingir o sistema elétrico de potência é o curto-circuito, que pode tirar uma máquina de sincronismo. Nos testes que serão apresentados em simulação, considerou-se um curto-circuito trifásico na barra terminal do gerador que leva a tensão da mesma a zero durante a falta.

Para a simulação de um curto-circuito trifásico na barra terminal do gerador, foi considerado que o sistema de geração de energia é composto um gerador síncrono, um sistema de excitação do tipo ST1A e de uma turbina hidráulica.

Para melhorar a resposta do sistema a perturbação imposta, algumas estratégias de controle foram verificadas. A primeira estratégia a ser utilizada consiste em implementar dois controladores PID. Um desses controladores será utilizado na turbina hidráulica, com a finalidade de controlar a variação da velocidade angular e, conseqüentemente, controlar a frequência. O outro controlador PID será utilizado para controlar a tensão de campo do sistema de excitação e, assim, regular a tensão na barra terminal do gerador. Neste teste, optou-se por utilizar o método da sintonia manual para se obter os valores dos ganhos proporcional, integral e o derivativo. A tabela 8 mostra os valores utilizados.

Tabela 8 – Ganhos do controlador PID para a turbina hidráulica e para o ST1A

Ganho	Turbina hidráulica	ST1A
K_p	0,01	2,4
K_i	0,005	0,01
K_d	0	0,002
T_d	0,2	0

Fonte: o Autor

Como o controle da turbina é feito na abertura da comporta, como discutido na seção 3.4.2, deve-se considerar o servomotor. Os valores utilizados para os parâmetros do servomotor são: $K_a = 0,07$, $T_a = 3,33$ e $R_p = 0,05$. O limite da velocidade para abrir e fechar a comporta é de $0,1 pu/s$.

A segunda estratégia foi a aplicação de um controle moderno, no caso, um controlador Fuzzy, que foi utilizado como um estabilizador PSS. Foram criadas 49 regras Fuzzy, apresentadas na Figura 36. Os rótulos linguísticos associados são: LN significa *Large Negative* (Negativo Grande), MN é *Medium Negative* (Negativo Médio), SN é *Small Negative* (Negativo Pequeno), ZE é *Zero* (Zero), SP é *Small Positive* (Positivo Pequeno), MP é *Medium Positive* (Positivo Médio) e LP é *Large Positive* (Positivo Grande).

		$\Delta\omega_r$						
		LN	MN	SN	ZE	SP	MP	LP
$\Delta\omega_r$	LN	LP	LP	LP	MP	MP	SP	ZE
	MN	LP	MP	MP	MP	SP	ZE	SN
	SN	LP	MP	SP	SP	ZE	SN	MN
	ZE	MP	MP	MP	ZE	SN	MN	LN
	SP	MP	SP	ZE	SN	SN	MN	LN
	MP	SP	ZE	SN	MN	MN	MN	LN
	LP	ZE	SN	MN	MN	LN	LN	LN

Figura 36 – Regras Fuzzy. Fonte: Adaptado de (HOANG; TOMSOVIC, 1996)

A Figura 37, mostra as funções de pertinência utilizadas para as duas entradas, que são a variação da velocidade angular e a velocidade da aceleração angular, e para o sinal de saída V_s , que é um sinal adicional de tensão na entrada do sistema de excitação.

Com as regras e as funções de pertinência, consegue-se chegar a curva de superfície para o controlador Fuzzy, representada na Figura 38. Neste teste, optou-se por utilizar o método da sintonia manual para encontrar os valores das constantes do controlador Fuzzy. Os valores utilizados para o controlador Fuzzy são: $K\omega_r = 40$, $K\ddot{\omega}_r = 9,25$ e $K = 5$.

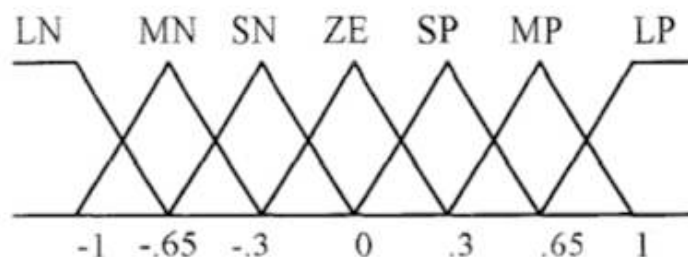


Figura 37 – Funções de pertinência. Fonte: (HOANG; TOMSOVIC, 1996)

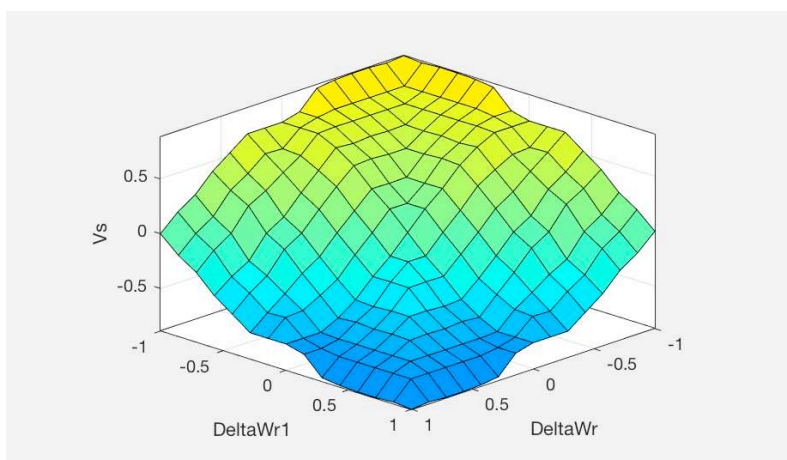


Figura 38 – Superfície de nível do controlador Fuzzy. Fonte: o Autor

Com os controladores implementados, foram feitas as simulações considerando o sistema em malha aberta, apenas com os dois controladores PID na turbina e no sistema de excitação e, por último, a utilização do controlador Fuzzy como um PSS como malha suplementar de controle de frequência.

4.2.1 Curto-circuito com tempo de falta de 0, 1s

Para o primeiro teste, considerou-se o curto-circuito trifásico na barra terminal com tempo de falta (t_f) com duração de 0,1 segundos ocorrendo em 3 segundos. As variáveis de controle são a tensão de campo E_{fd} , responsável pelo controle da tensão do gerador, e a abertura da comporta g , que é a variável envolvida no controle da frequência. A Figura 39 mostra como o controlador atua na tensão de campo, que é a saída do sistema de excitação ST1A.

Nota-se que, quando o sistema está em malha aberta, a tensão de campo permanece constante. Ao aplicar os controladores, percebe-se que o controlador Fuzzy torna a tensão de campo muito mais sensível as variações e aumenta o número de oscilações nos primeiros segundos, mas acaba estabilizando antes da configuração apenas com os

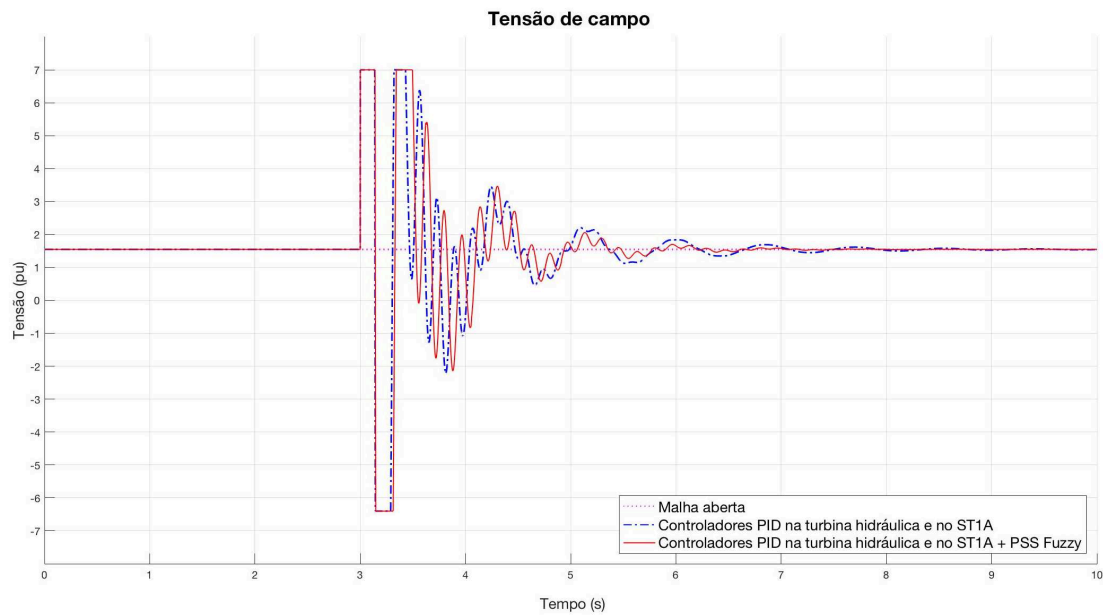


Figura 39 – Comportamento da variável de controle: tensão de campo. Fonte: o Autor

controladores PID. Nota-se também a limitação de tensão do sistema de excitação ST1A, já que a tensão atinge os picos máximo e mínimo de tensão de campo mostrados na tabela 5.

A Figura 40 mostra o comportamento da outra variável de controle, que é a abertura da comporta da turbina hidráulica. A variação da abertura da comporta tem como objetivo controlar a variação da velocidade angular do rotor do gerador e, consequentemente, controlar a frequência do sistema.

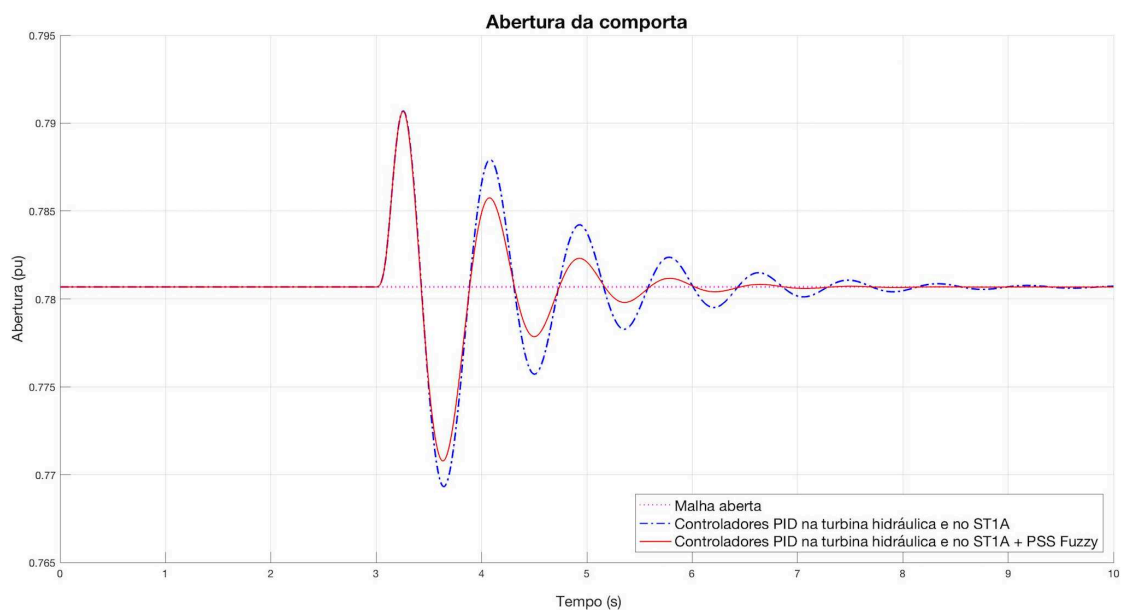
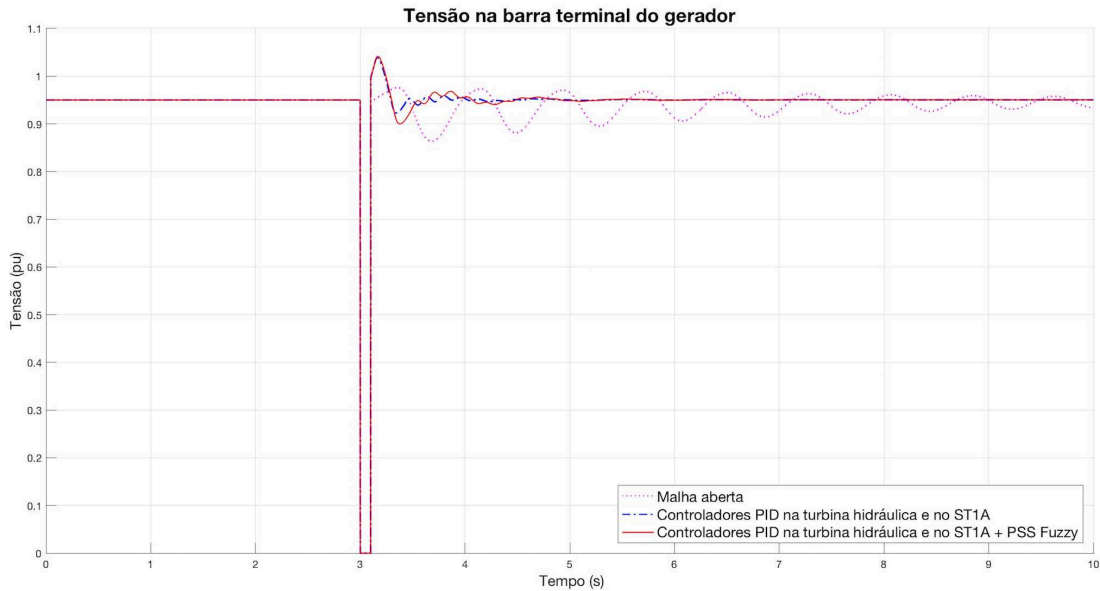
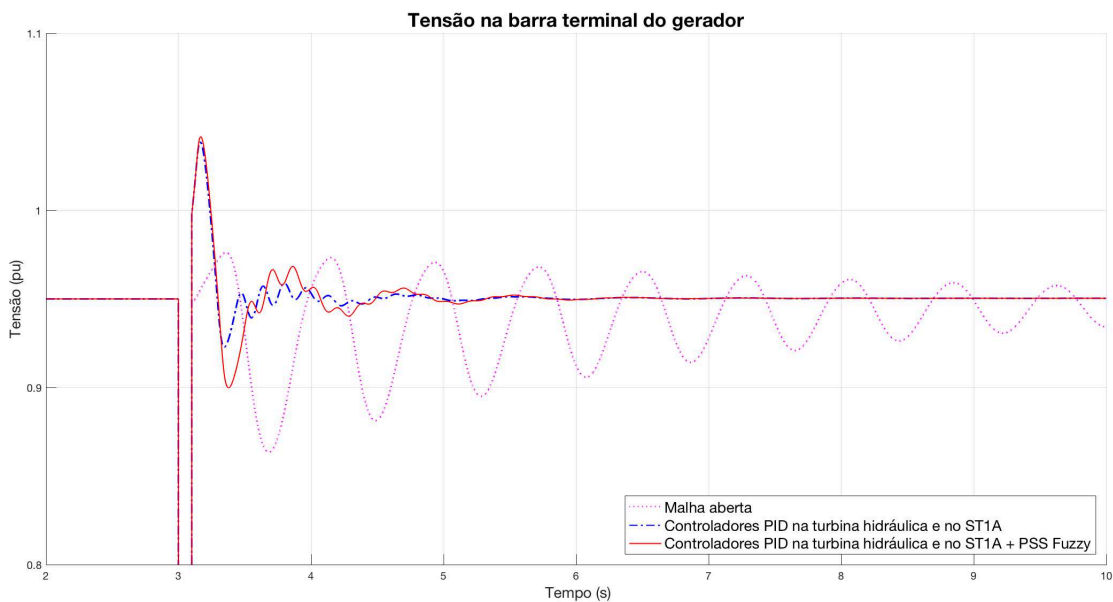


Figura 40 – Comportamento da variável de controle: abertura da comporta. Fonte: o Autor

Nota-se que, quando o sistema está em malha aberta, a abertura da comporta permanece constante. Porém, quando os controladores são adicionados para realizar o controle, observa-se uma variação para compensar a variação da velocidade angular e, assim, conseguir controlá-la. Verifica-se também que a adição do PSS Fuzzy atenua as oscilações e os seus respectivos picos, quando comparado com apenas os controladores PID.



(a) Tensão na barra terminal do gerador



(b) Detalhe da resposta transitória na tensão na barra terminal do gerador

Figura 41 – Resposta transitória da tensão na barra terminal com os controladores para o tempo de falta de 0,10 segundos. Fonte: o Autor

A Figura 41(a) mostra a resposta da tensão na barra terminal do gerador, que é uma das variáveis controladas. A Figura 41(b) mostra o detalhe na resposta transitória da

tensão na barra terminal. Pode-se notar que a presença dos controladores atenua os efeitos do curto-circuito na tensão da barra terminal do gerador, diminuindo consideravelmente o tempo de acomodação. Em malha aberta, o sistema tem um tempo muito maior de acomodação e oscilações apresentam valores de pico maiores. A presença do PSS Fuzzy acaba aumentando as oscilações na resposta transitória da tensão, quando comparado com apenas a presença dos controladores PID.

A Figura 42 mostra a variação da velocidade angular quando o sistema sofre um curto-circuito trifásico. Pode-se perceber que os controladores conseguem atenuar os efeitos do curto-circuito e acomodam o sistema muito mais rápido que quando o sistema está em malha aberta. O controlador Fuzzy, que atua como um estabilizador PSS, cumpre o seu objetivo e consegue diminuir as oscilações e melhorar a resposta transitória da variação de velocidade angular do rotor e, assim, controla a frequência do sistema.

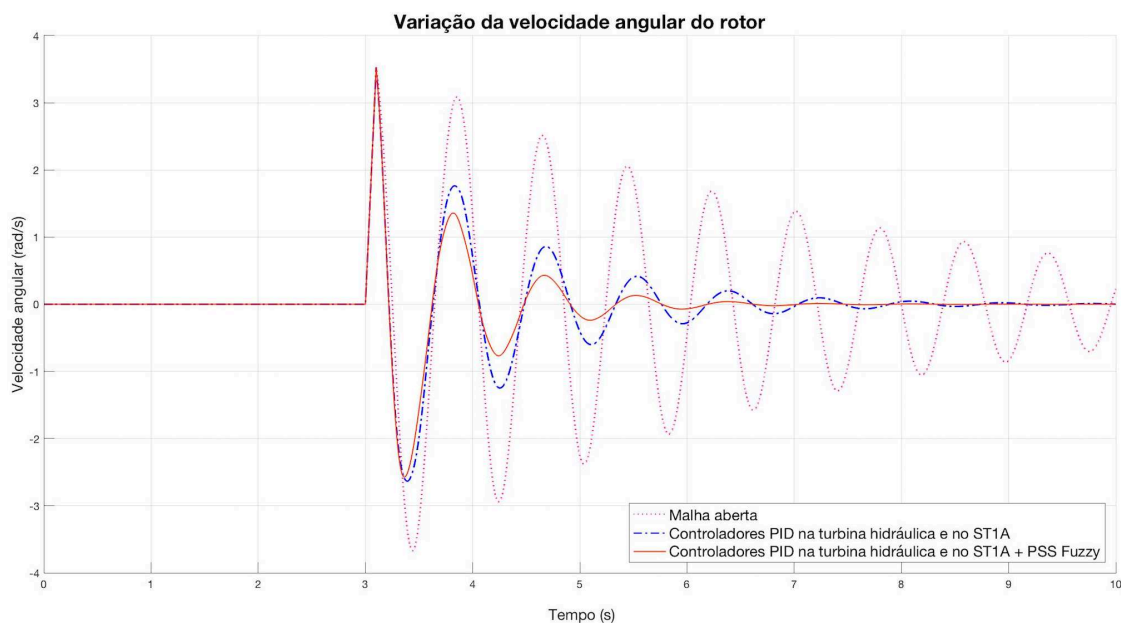


Figura 42 – Resposta transitória da variação angular do rotor para o tempo de falta de 0,10 segundos. Fonte: o Autor

Pode-se concluir que o PSS Fuzzy apresenta efeitos diferentes quando aplicado ao sistema. Enquanto a sua presença afeta negativamente a resposta transitória da tensão da barra terminal, aumentando as oscilações e o tempo de acomodação, o Fuzzy melhora consideravelmente a resposta transitória da variação da velocidade angular, diminuindo suas oscilações e o tempo de atenuação.

4.2.2 Curto-circuito com tempo de falta crítico em malha aberta

O segundo teste realizado foi a utilização dos controladores no tempo de falta crítico em malha aberta. Para determinar esse tempo, o sistema foi simulado em malha

aberta para diversos curto-circuitos trifásicos com tempos de falta diferentes até se chegar a t_f de 0,24 segundos. A Figura 43 mostra a resposta transitória da tensão do gerador para essa simulação. Nota-se que o sistema não tem a capacidade de voltar a se manter com uma tensão na barra terminal constante. A variação da velocidade angular do rotor e, conseqüentemente, a frequência, também não tem a capacidade de se manter constante, como mostra a Figura 44. Logo, o sistema perde o sincronismo e acaba atingindo a instabilidade. Quando isso acontece, o gerador deve ser retirado do sistema elétrico de potência.

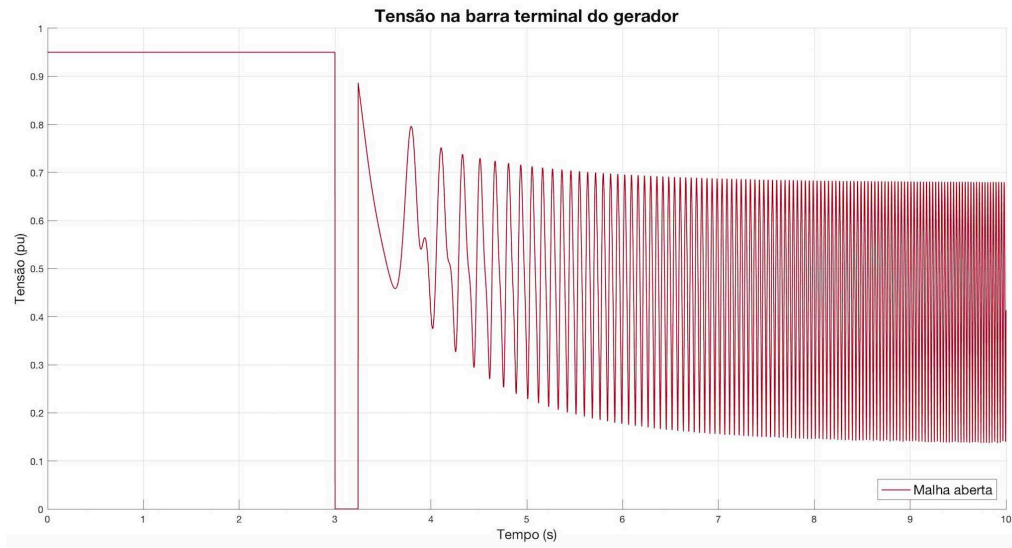


Figura 43 – Resposta transitória da tensão na barra terminal do gerador para o tempo de falta de 0,24 segundos. Fonte: o Autor

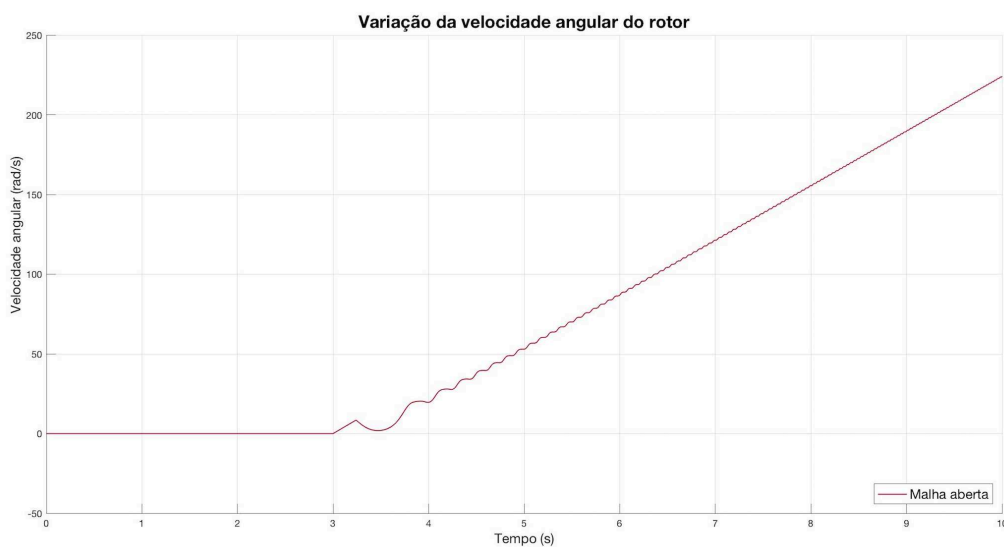


Figura 44 – Resposta transitória da variação angular do rotor para o tempo de falta de 0,24 segundos. Fonte: o Autor

Considerando t_f igual a 0,24 segundos, foram feitas duas simulações para analisar o efeito dos controladores. A primeira simulação contou apenas com os controladores PID aplicados na turbina hidráulica e no sistema de excitação ST1A e com o transdutor atuando, tendo os mesmos valores dos ganhos da tabela 8. Para a segunda simulação, foi implementada uma malha secundária para o PSS. Essa malha contém um controlador Fuzzy, que tem o objetivo de atenuar as oscilações da variação angular e, conseqüentemente a frequência do sistema.

A Figura 45 mostra a variação da tensão de campo por causa dos controladores que atuam no sistema de excitação com o objetivo de controlar esta variável. Ao comparar com a Figura 39, percebe-se que as oscilações na tensão de campo duram mais tempo do que no primeiro caso. Esse comportamento é coerente, já que a falta durou mais que o dobro do tempo, ou seja, foi mais intensa que no primeiro teste. Porém, percebe-se que o pico máximo e mínimo da tensão de campo apresentam os mesmos valores do primeiro teste e isso se deve às limitações deste sinal que o sistema de excitação apresenta.

Quando se compara apenas os resultados com os controladores PID e om os controladores PID mais a presença do controlador Fuzzy, percebe-se que as oscilações da tensão de campo aumentam quando o Fuzzy é aplicado. Isso se deve ao fato do estabilizador PSS ser um sinal suplementar adicionado a entrada do sistema de excitação ST1A e, assim, mantém o sistema mais sensível a variações de sinais.

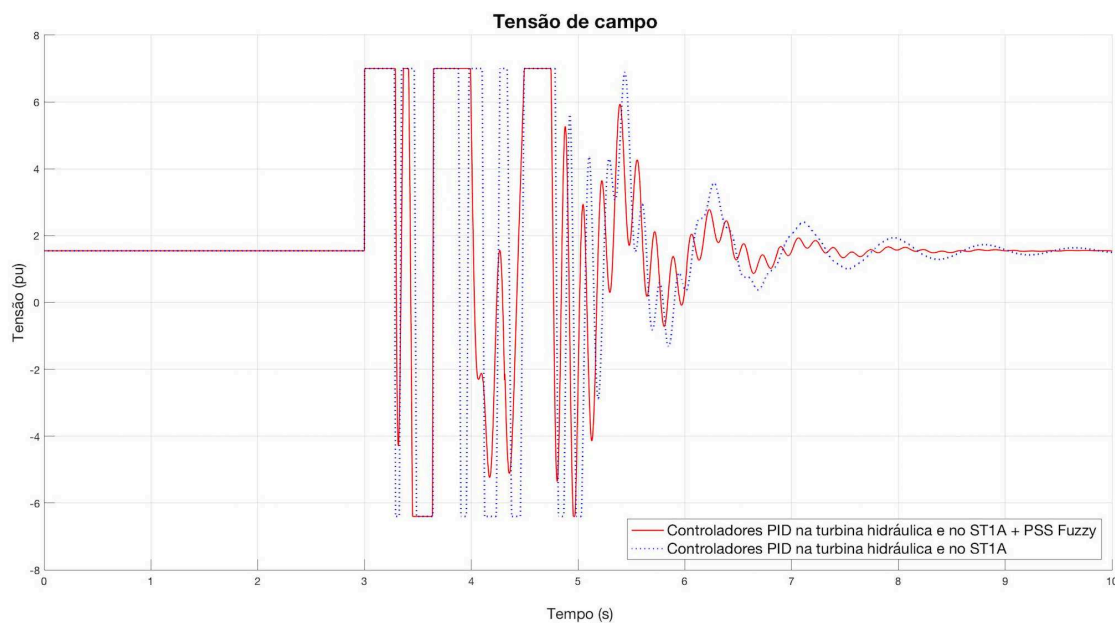


Figura 45 – Comportamento da variável de controle: tensão de campo. Fonte: o Autor

A Figura 46 mostra a variação da abertura da comporta da turbina. Percebe-se que a presença do controlador Fuzzy diminui as oscilações e o tempo de acomodação, apesar de não atuar diretamente na turbina. Isso acontece porque esse controlador atenua

a variação da velocidade angular, logo, a variação da abertura, utilizada como estratégia para controlar a velocidade angular, diminui.

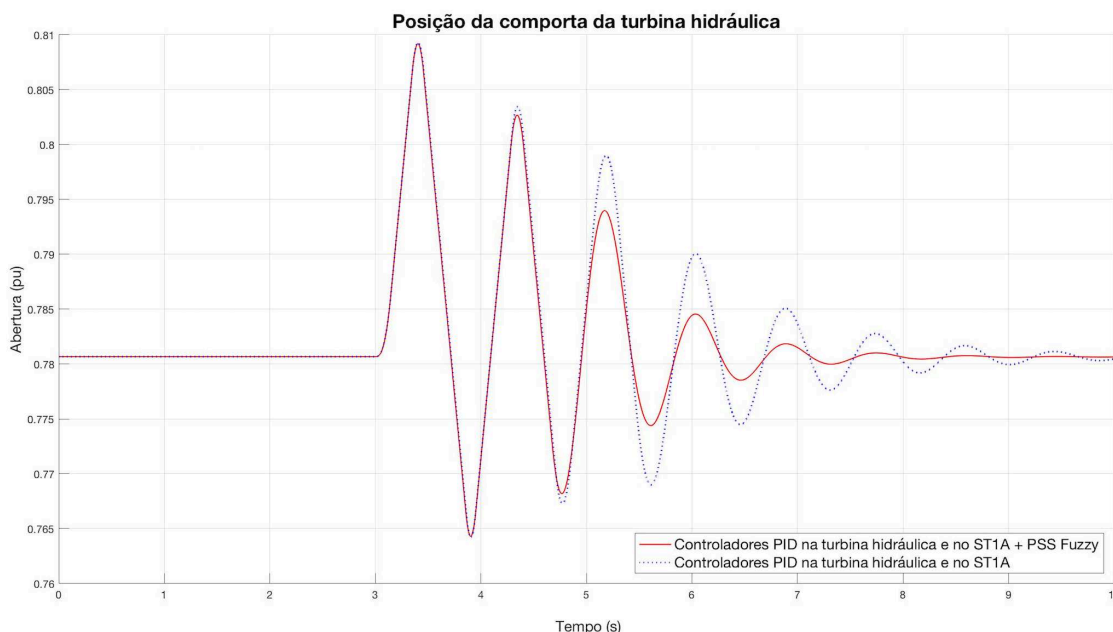
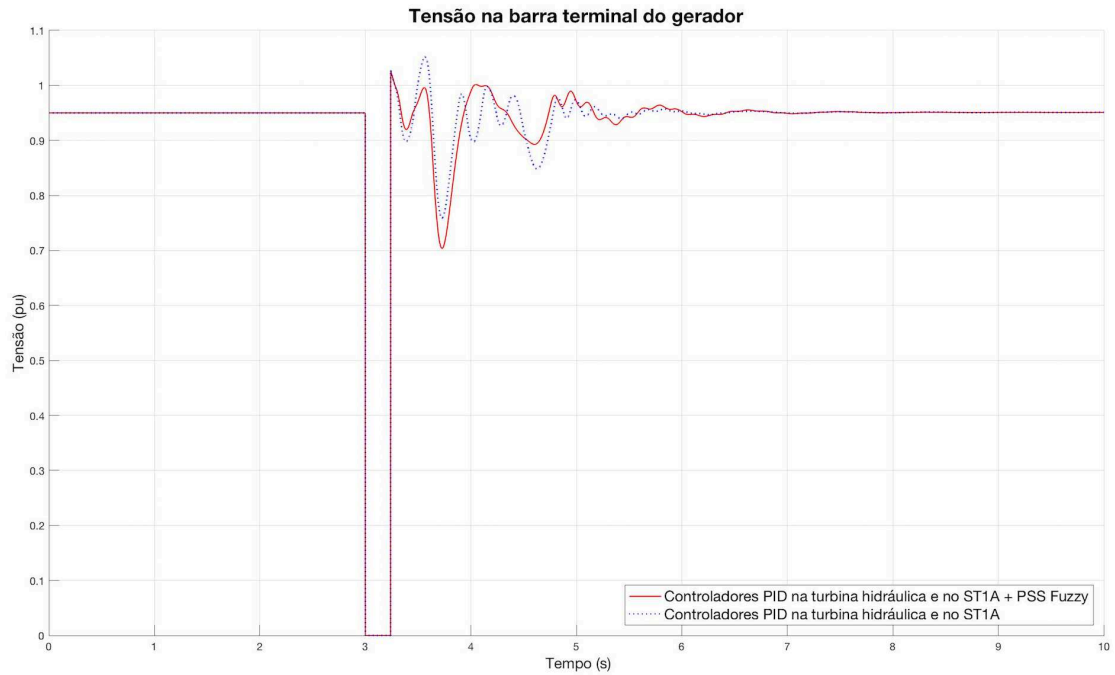


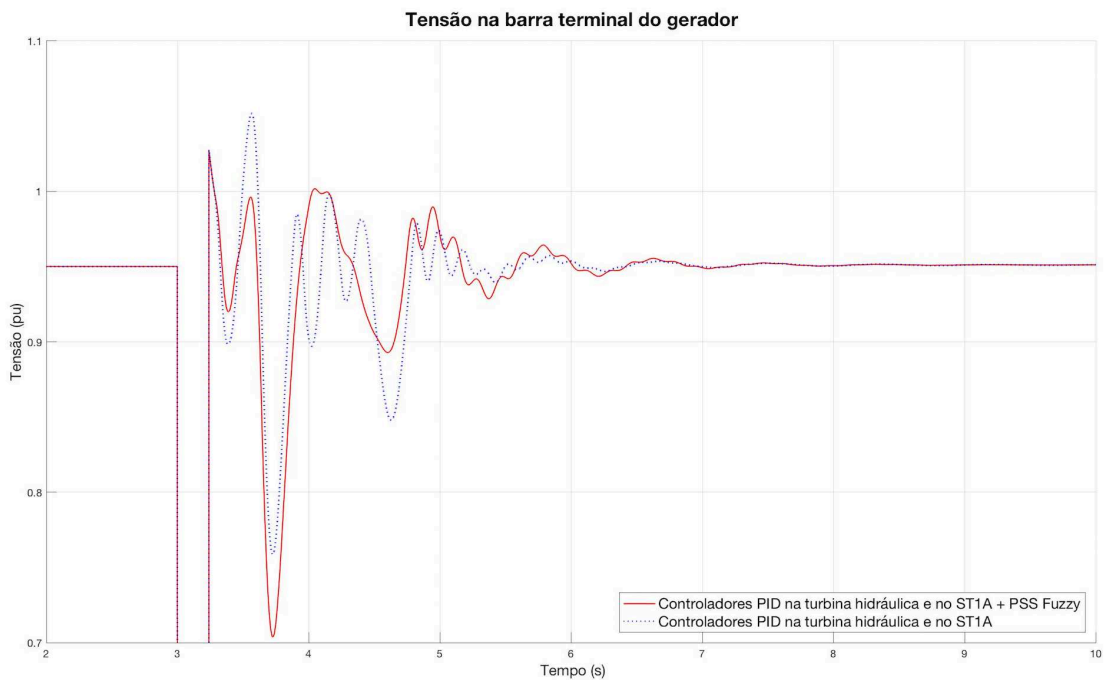
Figura 46 – Comportamento da variável de controle: abertura da comporta. Fonte: o Autor

A Figura 47 mostra o comportamento da tensão no terminal do gerador. Em comparação com a Figura 43, pode-se concluir que a aplicação de estratégias de controle é de extrema importância, pois garantem que o sistema consiga suportar faltas mais extremas, com tempos de falta maiores, e, ainda assim, voltar ao mesmo valor de tensão constante que o sistema operava antes da falta ocorrer. A Figura 47(b) mostra um detalhe para melhor análise da resposta transitória da tensão na barra terminal do gerador quando ocorre um curto-circuito. Pode-se notar que a presença do controlador Fuzzy acaba afetando a resposta transitória na tensão da barra de maneira negativa, pois acaba aumentando as oscilações com um sobressinal maior e com um tempo de acomodação maior da tensão.

Essa maior sensibilidade da tensão na barra terminal do gerador pode ser atribuída a presença do controlador Fuzzy funcionando como o estabilizador PSS no sistema de excitação. Esse estabilizador acaba contribuindo como um sinal de entrada do controlador PID que já estava implementado. Como visto na Figura 45, a saída do sistema de excitação, que é a tensão de campo que alimenta o gerador síncrono, apresenta mais oscilações com a presença do controlador Fuzzy, já que um sinal extra é adicionado na entrada do controlador PID.



(a) Tensão na barra terminal do gerador



(b) Detalhe da resposta transitória na tensão na barra terminal do gerador

Figura 47 – Resposta transitória da tensão na barra terminal com os controladores para o tempo de falta de 0,24 segundos. Fonte: o Autor

A Figura 48 mostra a resposta da variação angular do rotor quando um curto-circuito com tempo de falta de 0,24 segundos é aplicado. Fica evidente que a aplicação do controlador Fuzzy como um PSS melhora a resposta transitória, quando se analisa a variação angular do rotor e a frequência, pois ele atenua as oscilações da variação da velocidade angular e a frequência do sistema.

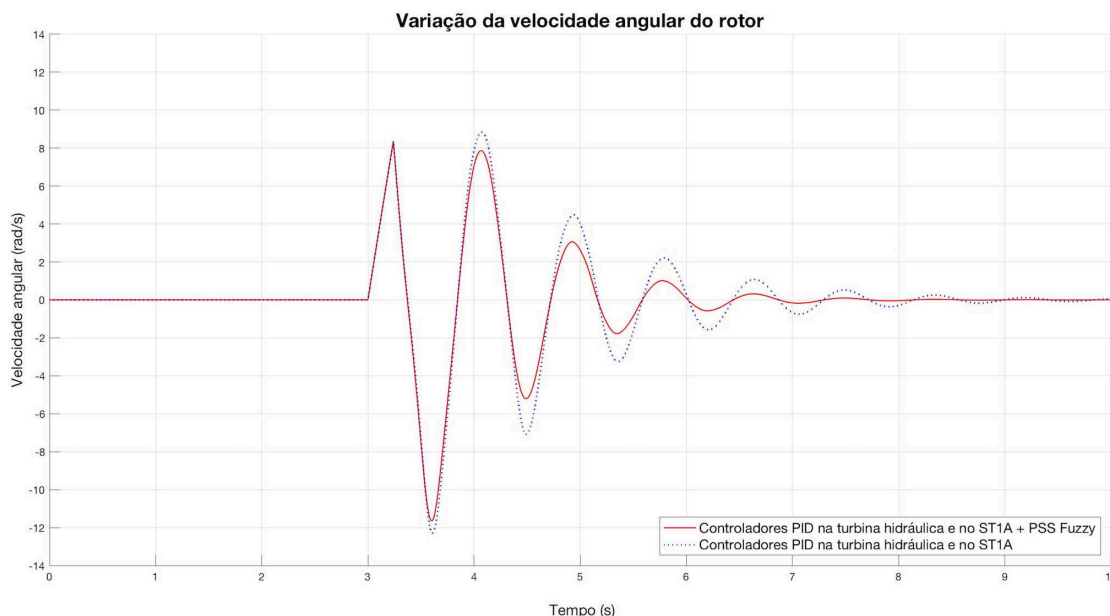


Figura 48 – Resposta transitória da variação da velocidade angular com controladores para o tempo de falta de 0,24 segundos. Fonte: o Autor

5 Conclusão

O presente trabalho apresentou a implementação de uma plataforma com os componentes do sistema de geração de energia elétrica dentro do sistema elétrico de potência. Além da implementação no *software Matlab/Simulink*, os modelos foram analisados em malha aberta para verificação, apresentando um comportamento consistente com esperado. Em seguida, foi analisado o uso de diferentes estratégias de controle clássico e moderno para o sistema completo em malha fechada submetido a perturbações.

Para a perturbação, foi considerado um curto-circuito trifásico na barra terminal do gerador. Foram feitos testes para encontrar o tempo de falta crítico em malha aberta, no qual o sistema consegue suportar uma falta sem perder o sincronismo e se tornar instável. Sabendo o tempo de falta crítico, foram analisados o comportamento do sistema para um tempo menor e igual que o tempo de falta crítico, com três diferentes cenários. O primeiro cenário é o sistema em malha aberta sem controle, o segundo cenário é o sistema em malha fechada com um controlador PID na turbina hidráulica e um controlador PID no sistema de excitação e o último cenário consiste na adição de um controlador Fuzzy como PSS para atenuação das oscilações do segundo cenário.

Os controladores se mostraram eficientes para a atenuação dos efeitos oscilatórios que um curto-circuito trifásico causa. Os controladores também mostraram que o sistema consegue suportar faltas mais graves com tempos de falta maiores sem perder o sincronismo e, conseqüentemente, perder a estabilidade.

A partir da plataforma implementada, pode-se pensar em várias hipóteses para

possíveis futuros trabalhos. Uma possibilidade é adição de mais modelos a plataforma, como outros tipos de sistema de excitação, geradores e outros componentes de conversão da fonte primária para a energia mecânica como, por exemplo, a implementação do modelo de um aerogerador. Também pode-se implementar a integração com a rede e a simulação de um sistema completo considerando as cargas, rede de transmissão e mais geradores. Do ponto de vista do controle, pode-se implementar diferentes tipos de controladores para a realização de um estudo mais aprofundado do controle do sistema.

Referências

ABIDO, M.; ABDEL-MAGID, Y. A hybrid neuro-fuzzy power system stabilizer for multimachine power systems. *IEEE Transactions on power Systems*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 1323–1330, 1998. Citado na página 2.

ANTOINE, J.; STUBBE, M. Eurostag, software for the simulation of power system dynamics. its application to the study of a voltage collapse scenario. In: IET. *Interactive Graphic Power System Analysis Programs, IEE Colloquium on*. [S.l.], 1992. p. 5–1. Citado na página 10.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. *Computer Modelling of Electrical Power Systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11 e 12.

BILOBROVEC, M.; MARÇAL, R. F. M.; KOVALESKI, J. L. Implementação de um sistema de controle inteligente utilizando a lógica fuzzy. *XI SIMPEP, Bauru/Brasil*, p. 42, 2004. Citado na página 8.

CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado na página 4.

COELHO, A. L. M. *Um Sistema Integrado de Testes de Funções de Proteção de Geradores Síncronos Associadas aos Limites de Excitação de um Modelo de AVR Implementado em Ambiente de Simulação Digital em Tempo Real*. 150 p. Tese (Dissertação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016. Citado na página 5.

COSTA, A. S. Turbinas hidráulicas e condutos forçados. *Notas sobre Turbinas Hidráulicas*, 2003. Citado na página 6.

COSTA, C. et al. Comparação de controladores fuzzy aplicados ao controle secundário do sistema amapá. In: *II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 947–952. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 33.

COSTA, D. C. L. Sistema de regulação em máquinas primárias. *Amazônia em Foco: Ciência e Tecnologia*, v. 1, n. 1, p. 30–45, 2012. Citado na página 6.

DIAS, F. F. G.; PILONI, F. C. *Análise de estabilidade transitória em sistemas elétricos de potência*. 60 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade de Brasília, Brasília, 2010. Citado na página 2.

- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Modern control systems*. [S.l.]: Pearson, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. *SBA controle & Automação*, v. 4, n. 3, p. 97–115, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- HOANG, P.; TOMSOVIC, K. Design and analysis of an adaptive fuzzy power system stabilizer. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 11, n. 2, p. 455–461, 1996. Citado 7 vezes nas páginas 7, 9, 20, 22, 23, 40 e 41.
- KUNDUR, P.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. *Power system stability and control*. [S.l.]: McGraw-hill New York, 1994. Citado 19 vezes nas páginas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 26, 27, 28, 36 e 38.
- MACHOWSKI, J. et al. *Power system dynamics and stability*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1997. Citado na página 2.
- MANTOVANI, P. R. A.; NEUMANN, P. N.; EDLER, M. A. R. Matriz energética brasileira: Em busca de uma nova alternativa. *REVISTA INTERDISCIPLINAR DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO*, v. 4, n. 1, 2017. Citado na página 6.
- MATA, C. G. *Uma Contribuição na Análise da Estabilidade Transitória dos Sistemas Elétricos de Distribuição na Presença de Geração Distribuída*. 109 p. Tese (Dissertação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Itajubá, Juiz de Fora, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 23.
- MATOS, R. M. *PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE ANGULAR DE GERADORES SÍNCRONOS*. 111 p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Citado na página 4.
- NICOLAU, N. M. V. *Excitação sem escovas de geradores síncronos: estudo de modelos e otimização do controle*. 58 p. Tese (Dissertação em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) — Instituto Superior Técnico Lisboa, Lisboa, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- NISE, N. S. *Engenharia de sistemas de controle*. [S.l.]: LTC, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- OLIVEIRA, S. E. et al. Programa anatem para simulação do desempenho dinâmico dos sistemas elétricos de potência. *IV SEPOPE, maio/1994, Foz do Iuaçu*, 1994. Citado na página 10.
- REPORT, I. Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 6, p. 1904–1915, 1973. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 38.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. Controle e modelagem fuzzy. *Blucher: FAPESP, São Paulo, BRA*, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 23.
- SIMULATOR, P. *PowerWorld Corporation*. [S.l.]: October, 2005. Citado na página 10.
- SRIDHAR, P.; PRASAD, K. B. Fault analysis in hydro power plants using matlab/simulink. *International Journal of Electrical Engineering and Technology (IJEET) 0976-6553, IAEME*, v. 5, p. 89–99, 06 2014. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 22.

SIMULATION AND ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL TRANSIENTS USING CLASSIC AND FUZZY CONTROLLERS

Welinton Barcelos Garcia *

2018

Abstract

Electric power quality depends on factors such as steady voltage and frequency that guarantee the system stability. When a system loses its stability, it means that it loses the capacity to be active. In other words, it loses the capacity to operate. This work aims to implement a toolbox for Matlab/Simulink that provides the components for a complete power generation system for simulation and analysis of transient events. In addition, simulation results of different operation scenarios in open and closed loop with classic and Fuzzy controllers are presented. It is expected that this work could contribute to develop a simulation tool that can be used in future studies about transient analysis and stability of power systems.

Key-words: Stability. Power systems. Controllers. Fuzzy control.

*Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88905-355. E-mail: welintonbarcelosg@gmail.com