

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ROGÉRIO DUARTE

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO PSS EM
HIDROELÉTRICA**

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO 2020.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ROGÉRIO DUARTE

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO PSS EM
HIDROELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para aprovação na unidade curricular TCC22010 do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Professor Orientador: Everthon Taghori Sica
Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 2020.

Duarte, Rogério

Simulação e análise da utilização do PSS em hidroelétrica/ Rogério Duarte;
Orientador, Everthon Taghori Sica – Florianópolis, SC, 2020.

76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. RT. 2. Frequência. 3. Potência. 4. PSS. I. Sica, Everthon Taghori. II. Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. III. Simulação do
comportamento da tensão e da frequência em um sistema de distribuição

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO PSS EM HIDROELÉTRICA

ROGÉRIO DUARTE

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro eletricista e aprovado na forma final pela banca examinadora do curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 14 de outubro, 2020.

Banca examinadora:



Prof. Everthon Taghori Sica, Dr. Eng.



Prof. Anésio Felipe Zeitune, Dr. Eng.



Prof. Daniel Tenfen, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho de conclusão de curso contou com o apoio de diversas pessoas, dentre as quais eu agradeço:

À minha família por todo apoio e incentivo na busca desse objetivo.

Ao meu orientador pela sua disponibilidade, auxílio e paciência na elaboração desse trabalho.

À minha namorada, Priscila, por todo companheirismo e compreensão em toda essa trajetória.

Aos amigos que fizeram parte de todo esse processo, seja auxiliando ou incentivando.

Aos colegas de trabalho da Reivax por todo conhecimento e experiência que me foi passado.

RESUMO

O sistema elétrico de potência, interligado nacionalmente, possui fontes de geração de energia proveniente de recursos diversos. Para elas é necessário que haja controle nos parâmetros de velocidade, tensão e potência. Os estabilizadores de potência cumprem o papel de amortecer a variação da potência, gerada ou consumida, quando há perturbação no sistema. O PSS – *Power System Stabilizer* é um tipo de estabilizador de potência inserido no regulador de tensão. Este atua de forma a atenuar as variações de potência ativa e de frequência e, com isso, deixando o sistema mais estável. Essas perturbações devem ser atenuadas e controladas para mitigar o número de desligamentos de geradores através do acionamento de proteções. O algoritmo do PSS faz com que o sistema se mantenha nos limites aceitáveis, sem perder geração ou conexão com o sistema interligado. Assim, através do uso do PSS o sistema se mantém ativo e gerando com qualidade por um maior período devido à robustez acrescida. Além disso, é imprescindível notar que a presença de um estabilizador faz com que o sistema se torne mais confiável.

PALAVRAS-CHAVE: RT. Frequência. Potência. PSS.

ABSTRACT

The electric power system, interconnected nationally, has sources of energy generation from different resources. For them it is necessary to have control in the parameters of speed, voltage and power. Power stabilizers fulfill the role of dampening the variation in power, generated or consumed, when there is a disturbance in the system. The PSS - Power System Stabilizer is a type of power stabilizer inserted in the voltage regulator. The PSS acts in order to attenuate the variations of active power and frequency, thereby making the system more stable. These disturbances must be mitigated and controlled to mitigate the number of generator shutdowns by activating protections. The PSS algorithm keeps the system within acceptable limits, without losing generation or connection to the interconnected system. Thus, through the use of PSS the system remains active and generating with quality for a longer period due to the increased robustness. In addition, it is essential to note that the presence of a stabilizer makes the system more reliable.

Keywords: RT. Frequency. Power. PSS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema elétrico de Potência Clássico.	6
Figura 2. Fatores que influenciam na estabilidade da frequência.	7
Figura 3. Classificação de problemas de estabilidade do SEP.	8
Figura 4. Fontes de geração de energia elétrica introduzida na matriz do Brasil.	10
Figura 5. Esquemático da máquina síncrona.	12
Figura 6. Circuito representando o estator e o rotor da máquina síncrona	13
Figura 7. Controlador de velocidade de um RV.....	19
Figura 8. Diagrama de bloco do funcionamento do RT.	21
Figura 9. Modelo de AVR ST1C.	22
Figura 10. Diagrama de blocos de um PSS.	25
Figura 11. PSS1A com uma entrada.	27
Figura 12. PSS2C com duas entradas.	27
Figura 13. PSS4C com multi-band	28
Figura 14. Gráfico da potência ativa e da tensão terminal dado um degrau de tensão na UHSO.	29
Figura 15. Variação da potência ativa no fechamento de linhas de transmissão ligadas a usina.....	30
Figura 16. Curvas da aplicação da ABB sem PSS.....	31
Figura 17. Curvas da aplicação da ABB com PSS.....	32
Figura 18. Modelo de simulação de sistema elétrico construído no Matlab/Simulink	33
Figura 19. Bloco de demanda do Simulink utilizado no modelo proposto.	38
Figura 20. Bloco de barra-infinita do Simulink utilizado no modelo proposto.	39
Figura 21. Bloco de transformador trifásico do Simulink utilizado no modelo proposto.....	39
Figura 22. Bloco da máquina síncrona do Simulink utilizado no modelo proposto....	40
Figura 23. Bloco de RV do Simulink utilizado no modelo proposto.	42
Figura 24. Diagrama de blocos do bloco do RV.	44
Figura 25. Diagrama de blocos da turbina hidráulica.	44
Figura 26. Diagrama de blocos do servo-motor.	45
Figura 27. Bloco do RT do Simulink utilizado no modelo proposto.	45
Figura 28. Diagrama de blocos do RT.....	47
Figura 29. Modelo de PSS utilizado na Simulação.....	47
Figura 30. Saída de potência ativa da simulação com degrau de tensão.	51

Figura 31. Velocidade do rotor da simulação com degrau de tensão.....	52
Figura 32. Saída de tensão terminal da simulação com degrau de tensão.....	53
Figura 33. Saída de potência ativa da simulação com degrau de potência.	54
Figura 34. Velocidade do rotor da simulação com degrau de potência.....	56
Figura 35. Saída de tensão terminal da simulação com degrau de potência.	57
Figura 36. Saída de potência ativa da simulação com aumento da demanda.	58
Figura 37. Velocidade do rotor da simulação com aumento da demanda.....	59
Figura 38. Saída de tensão terminal da simulação com aumento da demanda.....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	3
1.2	JUSTIFICATIVA	3
1.3	OBJETIVO GERAL	4
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	6
2.1.1	Estabilidade em sistemas elétricos de potência	7
2.2	GERAÇÃO HIDROELÉTRICA	9
2.3	MÁQUINA SÍNCRONA	11
2.3.1	Reguladores de Velocidade - RV	17
2.3.2	Reguladores de Tensão - RT	20
3	PSS	24
3.1	TIPOLOGIAS DE PSS	26
4	MODELO E RESULTADOS	33
4.1	MODELO PROPOSTO	33
4.2	MODELAGEM	37
4.2.1	Modelo da Demanda	37
4.2.2	Modelo da barra-infinita	38
4.2.3	Modelo do transformador trifásico	39
4.2.4	Modelo da máquina síncrona	40
4.2.5	Modelo do RV	42
4.2.6	Modelo do RT	45
4.2.7	Modelo do PSS	47
4.3	SIMULAÇÕES REALIZADAS	48
4.3.1	Degrau de 20% de Tensão de campo	48
4.3.2	Degrau de 20% de Potência	49
4.3.3	Variação de demanda	49
4.4	RESULTADOS OBTIDOS	50
5	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional traz uma necessidade cada vez maior de energia. Para suprir todos os usuários, e acrescentando as necessidades das indústrias, se faz válido ter um sistema robusto de geração e transmissão de energia. A demanda deve ser abastecida com qualidade e de forma ininterrupta, atendendo todos os parâmetros de qualidade exigidos pelos órgãos reguladores.

Quando há geração de energia, independente da fonte primária, é imprescindível monitorar os níveis de tensão, frequência e potência e mantê-los dentro dos limites aceitáveis. A demanda de energia elétrica do sistema elétrico de potência (SEP) é extremamente elevada, necessitando assim de grandes usinas geradoras e de um sistema de transmissão e distribuição complexo, para possuir um sistema robusto e reduzir as perdas do SEP.

Os sistemas de proteção e reguladores de tensão e de velocidade são itens importantes quando se trata de controle da geração de energia. Através desses recursos é que se faz com que o sistema se mantenha estável e, com isso, mais confiável. Dentro desses itens há inúmeros comandos e dispositivos que atuam de acordo com sua especificidade. O estabilizador de potência (PSS – *Power System Stabilizer*) é um algoritmo que pode ter como dado de entrada a variação da velocidade angular do rotor, a potência elétrica ou a frequência. Nesse algoritmo é realizada a análise do sistema de geração como um todo, observando o comportamento das grandezas do sistema conforme necessário. Existem PSS's com configurações distintas. Cada grandeza pode ser útil de forma diferente para a resolução de problemas de estabilidade. Esse controlador tem uma significativa importância nos reguladores, e o estudo dele é importante para entender como o sistema mantém a energia gerada nos níveis de qualidade necessários. O auxílio dele na geração demonstra resultados efetivos no amortecimento da potência e da frequência em perturbações no sistema. Dentre essas, muitas vezes com o uso do mesmo evita-se danos a geração.

1.1 Definição do problema

Este trabalho aborda a dinâmica do sistema de geração de energia elétrica. A geração, independente da fonte primária, necessita que haja controle de velocidade e tensão. Um estudo é apresentado a fim de analisar o comportamento da tensão, potência e frequência quando a unidade geradora é submetida a alguma perturbação. O tipo de perturbação independe na análise, pois, o objetivo é analisar se os reguladores de velocidade e tensão agem de forma satisfatória, deixando o sistema dentro dos parâmetros de qualidade impostos pelos órgãos reguladores, levando isso em consideração, é importante verificar a real eficácia de controladores como o estabilizador de potência em uma unidade geradora, quando solicitado.

1.2 Justificativa

Para que o sistema interligado nacional funcione de forma correta é necessário que se tenha formas de controle que mantenham a energia gerada dentro da qualidade exigida. É imprescindível que seja evitada interrupção no fornecimento por meio de desligamentos devido ao acionamento do sistema de proteção, em casos que possam ser evitados com a utilização de controladores auxiliares. Com isso, temos os reguladores de velocidade (RV) e tensão (RT) que agem em conjunto no controle de unidades geradoras de energia elétrica. Esses elementos já são conhecidos, porém, para o correto funcionamento, o balanço de potência deve estar adequado. Qualquer alteração nesse balanço pode acarretar em uma variação de frequência, que pode ocorrer de forma abrupta e com isso levando à falta ou desligamento da máquina. Em alguns cenários mais críticos, o desligamento do sistema. Nesse cenário, o RV é responsável pela manutenção do balanço de potência, entretanto, ele não responde de forma eficaz e rápida. Para isso, é inserido um estabilizador de potência (PSS – *Power System Stabilizer*) no RT, esperando-se uma resposta mais rápida com uma menor oscilação. O estudo elaborado aborda aspectos que são benéficos ao sistema e assim o tornando mais confiável.

1.3 Objetivo Geral

Analisar os efeitos da utilização do estabilizador de potência (PSS - *Power System Stabilizer*) no comportamento da potência, tensão e frequência em um sistema elétrico de potência baseado em uma máquina síncrona.

1.4 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para a elaboração deste trabalho são:

- a) elaborar um modelo para simulação com uma planta hipotética para análise dos dados;
- b) implementar modelo para simulação dinâmica;
- c) elaborar curvas de potência, tensão e frequência com e sem a utilização do PSS;
- d) analisar os dados obtidos com o modelo da simulação.

1.5 Estrutura do trabalho

No capítulo 1 é apresentada uma introdução do tema abordado no presente trabalho. Além disto, são apresentados a definição do problema, a justificativa do mesmo e os objetivos a serem alcançados com esse trabalho.

Já no capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica dos principais temas relacionados ao trabalho. Nesta parte são abordados conceitos fundamentais para o entendimento do presente trabalho.

O capítulo 3 é sobre o PSS (*power system stabilizer*). Este controlador é muito importante para o controle do sistema elétrico de potência considerado no presente trabalho.

No capítulo 4 é apresentado o modelo proposto para a simulação e os ensaios realizados nele. Além disto, também está disposto os resultados obtidos com os ensaios.

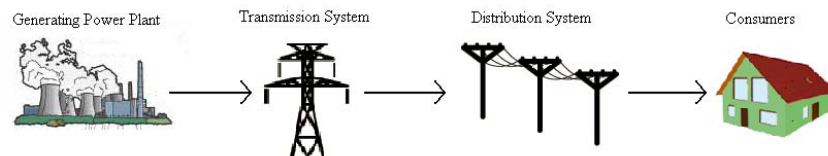
Por fim, no capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho e as considerações finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistema elétrico de potência

O sistema elétrico clássico, segundo Dulau e Abrudean (2015), tem uma sequência bem delineada do caminho percorrido pela energia elétrica, como pode ser observado na Figura 1. A energia elétrica advinda das grandes usinas de geração de energia elétrica percorre o sistema de transmissão e o de distribuição, para assim ser consumida pelo usuário final.

Figura 1. Sistema elétrico de Potência Clássico.



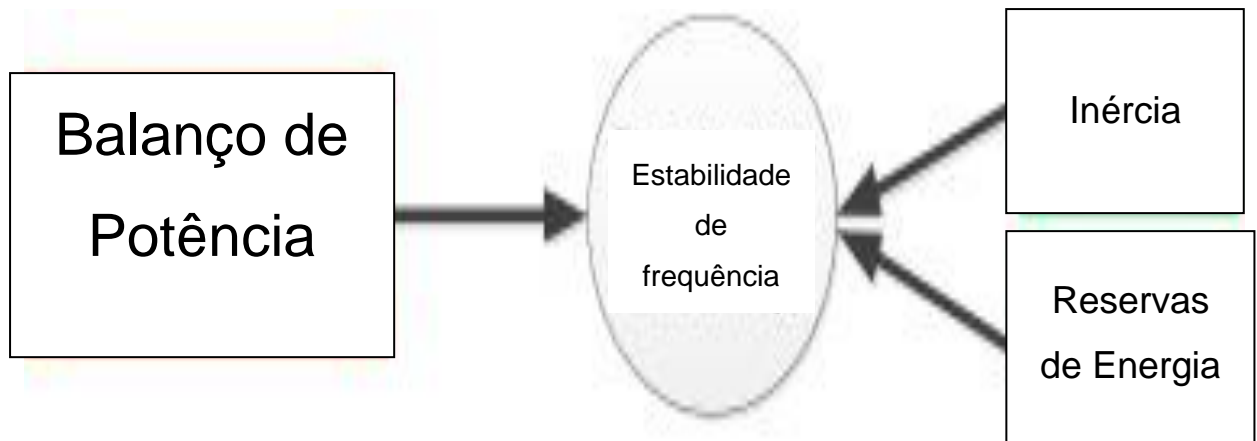
Fonte: DULAU; ABRUDEAN (2015).

Entretanto, o sistema existente é muito mais complexo que o apresentado na Figura 1. O sistema interligado nacional (SIN) contém geradores de grande, médio e pequeno porte ao longo do sistema de transmissão e distribuição. Além disso, o movimento de microgeração distribuída pelo lado da demanda está se tornando cada vez mais substancial.

Devido às complexidades dos sistemas elétricos de potência, o controle de fatores essenciais para o correto funcionamento é extremamente importante. Segundo Kahouli, Guesmi, Abdallah e Ouali (2009), o sistema elétrico de potência além de manter o balanço de potência entre a geração e a demanda necessita manter seus níveis de frequência e tensão. Deste modo, o sistema elétrico mantém a estabilidade.

Segundo Zografos, Ghandhari e Eriksson (2018), o parâmetro mais importante no SEP é a estabilidade da frequência. Esta depende de três fatores para se manter em níveis adequados: o balanço de potência, as reservas de energia e a inércia do sistema de potência. Na Figura 2 é mostrado os fatores aos quais possuem influência na estabilidade da frequência.

Figura 2. Fatores que influenciam na estabilidade da frequência.



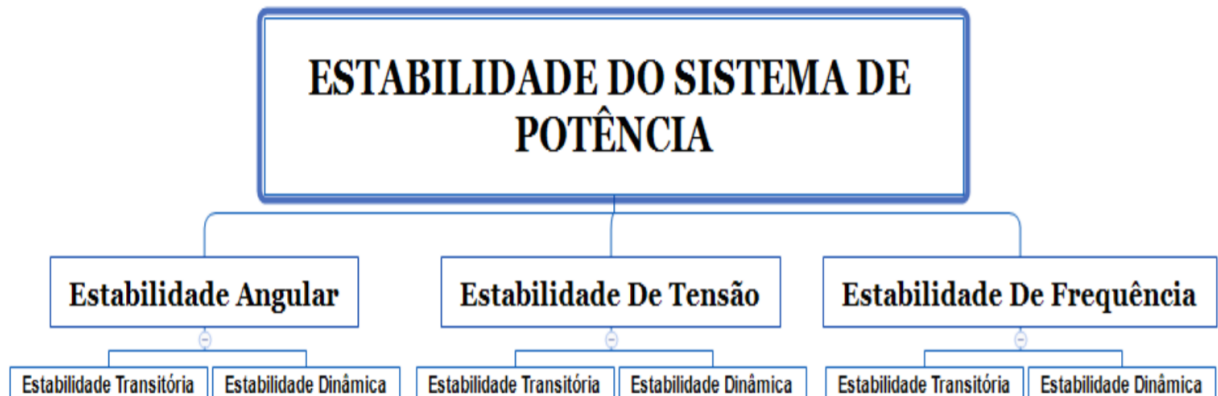
Fonte: Adaptado de ZOGRAFOS; GHANDHARI; ERIKSSON (2018).

2.1.1 Estabilidade em sistemas elétricos de potência

O sistema elétrico de potência, além de suprir a potência demandada no nível de tensão e frequência solicitados, deve ser robusto e estável. Assim, o conceito de estabilidade para sistemas elétricos de potência exemplificado por Pupin (2009) é que “a estabilidade se refere ao comportamento do sistema após este sofrer algum tipo de perturbação, seja de pequena ou grande intensidade”. De acordo com Siqueira (2016), Kundur, Balu e Lauby (1994) a estabilidade do sistema de potência é uma relação não linear entre a potência e a variação da posição angular do rotor.

Segundo Siqueira (2016), “existem três tipos principais de categorias de estabilidade de sistemas de potência, a estabilidade angular, estabilidade de tensão e a estabilidade de frequência”. Como está disposto na Figura 3, a estabilidade do sistema elétrico de potência (SEP) pode ser dividida em estabilidade angular, de tensão e de frequência e cada categoria de estabilidade pode ser observada no âmbito de estabilidade transitória e de estabilidade dinâmica.

Figura 3. Classificação de problemas de estabilidade do SEP.



Fonte: SIQUEIRA (2016).

Dentre as três principais estabilidades do sistema elétrico de potência (SEP), segundo Siqueira (2016), Kundur, Balu e Lauby (1994) e Barbosa (2013), a estabilidade angular tem relação com a capacidade da máquina em manter o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico. Quando isso não ocorrer, haverá instabilidade no sistema e perda de sincronismo devido ao aumento das oscilações angulares.

Assim como a estabilidade angular, Siqueira (2016), Kundur, Balu e Lauby (1994) e Barbosa (2013) definem a estabilidade de tensão como a capacidade do SEP em manter os níveis de tensão constantes em todas as barras do sistema, mesmo que submetido a alguma perturbação, ou encontrar e permanecer em um novo nível de tensão aceitável após a perturbação.

A estabilidade de frequência tem uma grande importância, pois, segundo Siqueira (2016), Kundur, Balu e Lauby (1994) e Barbosa (2013), com o comportamento da frequência é possível analisar o funcionamento das máquinas de um sistema elétrico. Com isso, a estabilidade de frequência pode ser vista como a capacidade do SEP de manter a frequência em níveis aceitáveis mesmo após uma grande perturbação no sistema. Sistemas de geração que possuem estabilidade na frequência devem ser capazes de restaurar o balanço entre geração e demanda, com o mínimo de perda de geradores e de cargas.

Além das três classificações de estabilidade demonstradas na Figura 3, também é possível classificar em estabilidade dinâmica e transitória. Segundo

Siqueira (2016) e Kundur, Balu e Lauby (1994), a estabilidade transitória pode ser vista como a capacidade do sistema de se recuperar de grandes perturbações, como um curto-circuito, e é analisada em um curto período de tempo. Já a estabilidade dinâmica é a capacidade do sistema de absorver e se adaptar às pequenas variações de demanda e geração durante o dia.

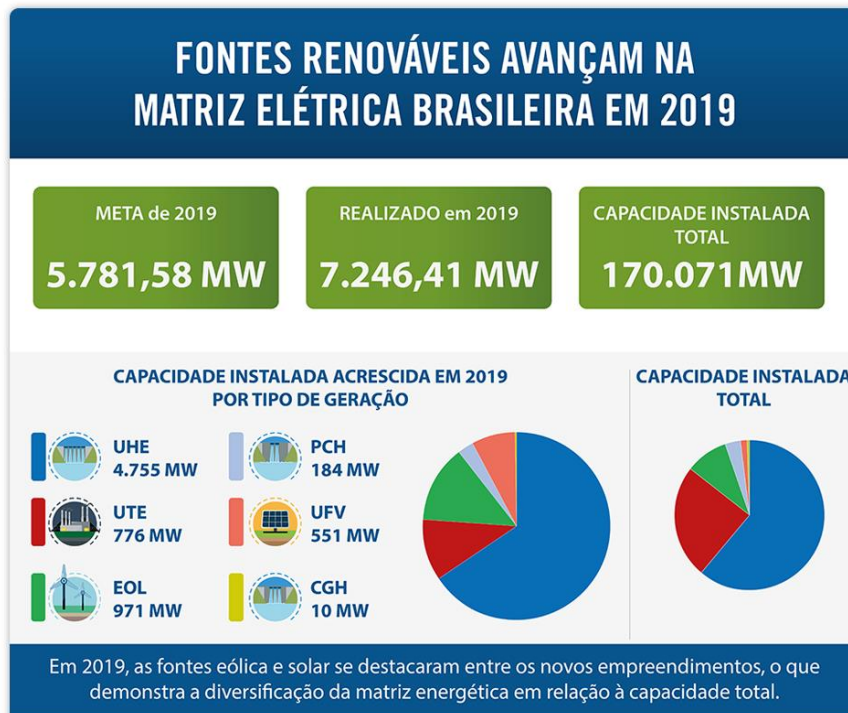
Nota-se, deste modo, que o sistema elétrico de potência (SEP) está sujeito a diversas oscilações que ameaçam a estabilidade do sistema. Alguns exemplos de oscilações são perdas de geradores, variação brusca de carga, obstrução da entrada dos dutos dos distribuidores, inserção de cargas não-lineares no sistema, curto-circuito, entre outros. Ou seja, o sistema elétrico está constantemente sujeito à possibilidade de ocorrência do estado de instabilidade. Para atenuar isso, é necessário que se aumente a robustez do SEP, que o sistema seja prioritariamente composto por grandes máquinas girantes que possuem uma maior inércia e estabilidade, ou tecnologias similares ou equivalentes.

Por mais que iniciativas para aumento e diversificação de fontes renováveis, como geração de energia solar e eólica, sejam necessárias para diversificação da geração de energia elétrica no SEP. No ponto de vista de estabilidade do SEP a geração de energia elétrica por grandes máquinas girantes, robustas e de elevada inércia, ainda são necessárias, como as existentes em algumas plantas hidroelétricas, representando mais da metade da energia elétrica gerada no país.

2.2 Geração Hidroelétrica

A geração hidroelétrica é a forma de geração de energia elétrica mais utilizada no Brasil. Segundo a Aneel (2020) essa modalidade de geração continua sendo a com maior crescimento, como pode ser observado na Figura 4, mas também é possível notar que o crescimento não se restringe exclusivamente à geração hidroelétrica.

Figura 4. Fontes de geração de energia elétrica introduzida na matriz do Brasil.



Fonte: Aneel (2020).

A geração hidroelétrica é, deste modo de extrema importância no cenário nacional, pois é a maior fonte de geração de energia elétrica no Brasil e é a maior responsável pela robustez do sistema elétrico nacional. A geração hidroelétrica tem como fonte de energia primária o movimento da água. Há a possibilidade de utilizar a queda d'água ou a vazão, por meio de usinas do tipo reservatório e fio d'água, em ambas temos turbinas de diversos modelos, cada qual com sua especificidade. As turbinas que têm o uso mais comum no país, para a inserção em usinas de geração de energia elétrica através do recurso hídrico, são: Pelton, Francis e Kaplan.

As turbinas geradoras do tipo Pelton, devido a sua velocidade de rotação ser maior que as demais, são utilizadas em grandes quedas d'água. Essa turbina, que possui formato circular, e conchas ao seu redor. O modo de controle, desse tipo de turbina, é feito por meio de agulhas (bicos injetores) que possuem um sistema de controle de vazão da quantidade de água que é inserida nas conchas. As turbinas do tipo Francis são adequadas para quedas d'água com altitude média. Seu formato é de um caracol, e a entrada de água nesse modelo é distinta do anterior, a água entra

de uma forma espiral, onde há pás que controlam o ângulo de inserção da água que entra na turbina. O sistema de controle conta, também, com pás menores para um ajuste mais preciso. Através desse sistema temos uma pressão de saída muito menor do que na entrada. Isso é devido ao movimento da água dentro da turbina. A energia cinética da água é destinada para mover a turbina se transformando em energia mecânica, com isso a pressão de saída da água é menor. O tipo de turbina Kaplan conta com um formato semelhante a uma hélice, sendo utilizado para baixas alturas, porém com grandes vazões. A diferença nesse modelo referente à Francis é que as pás de controle estão acopladas no eixo de rotação ligado ao gerador.

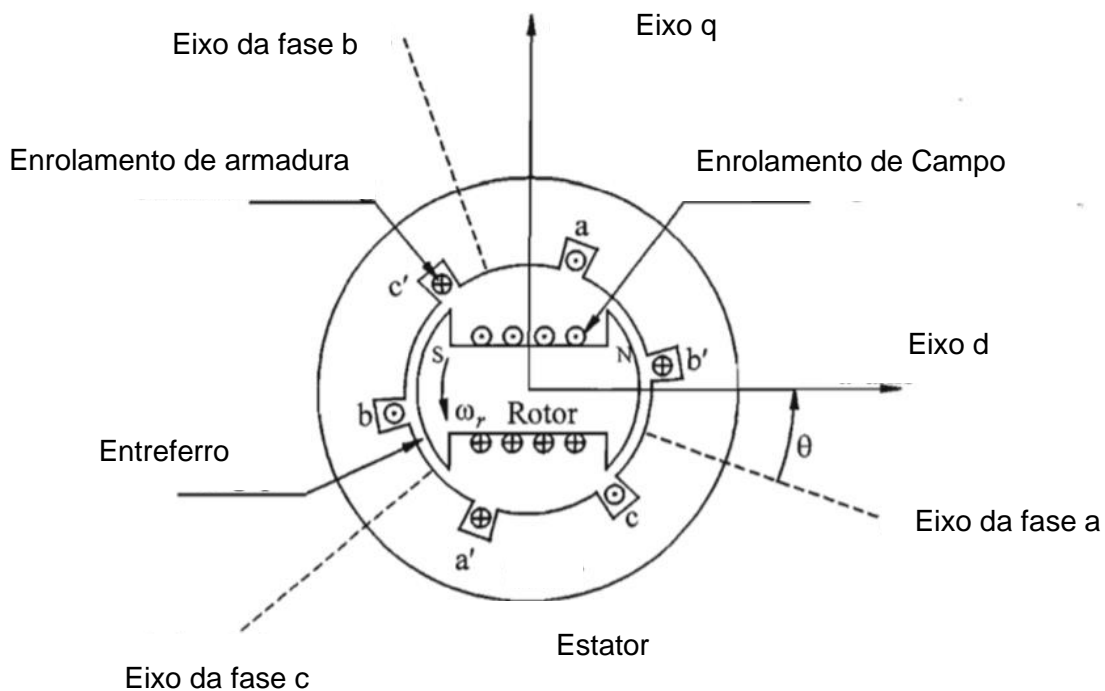
O fluxo energético inicia-se com a fonte primária, neste caso a água. Nas turbinas a energia cinética da água é transformada em energia mecânica ao passar pela turbina. Essa energia é transferida para o gerador por meio do eixo de ligação acoplado ao volante de inércia. O gerador pode ser tanto uma máquina síncrona como assíncrona. Os tipos mais utilizados para a geração no país são máquinas síncronas, as quais são o objeto desse estudo.

2.3 Máquina síncrona

A máquina síncrona é composta essencialmente pelo rotor, estator, enrolamento de campo e enrolamento de armadura. O rotor é a parte girante da máquina que pode ser constituído por pólos lisos ou salientes. Nele pode-se encontrar os enrolamentos de campo. O rotor é acoplado ao eixo girante e sustentado pelos mancais. A ligação elétrica dos enrolamentos de campo é feita através de escovas e quando utilizado como gerador é utilizada uma corrente contínua para induzir uma corrente alternada nos enrolamentos de armadura do estator. O estator é a parte fixa da máquina síncrona onde estão inseridos os enrolamentos de armadura. O enrolamento de campo é onde a corrente contínua entra, quando utilizado como gerador, fazendo com que o rotor tenha uma corrente alternada que foi induzida pelo campo magnético criado. Essa corrente alternada é disponibilizada no terminal do gerador. Alguns dos componentes da máquina ainda são o eixo, os mancais e os enrolamentos amortecedores. O eixo está no centro do rotor. Os mancais são toda a parte de sustentação do rotor. Os enrolamentos amortecedores amortecem oscilações do conjugado mecânico para que não haja perda de sincronismo e saída da máquina

do sistema. Este também pode reduzir sobretensões momentâneas. Alguns desses componentes da máquina síncrona podem ser observados na Figura 5.

Figura 5. Esquemático da máquina síncrona.



Fonte: Adaptado de Kundur, Balu e Lauby (1994).

As máquinas síncronas podem ser utilizadas como geradores ou motores. Para uma melhor compreensão dessa máquina se faz necessário entender o funcionamento e a composição das diversas partes que ela possui. Ela é projetada para a interação da movimentação mecânica com a eletromagnética. (ARAÚJO, 2011; GARCIA, 2018; KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

O estator, segundo Araújo (2011), “é constituído de partes magnéticas estacionárias, incluindo o pacote laminado de chapas de aço silício isoladas entre si, com o intuito de prevenir a indução de correntes parasitas”. Além disso, também é onde está localizado o enrolamento de armadura.

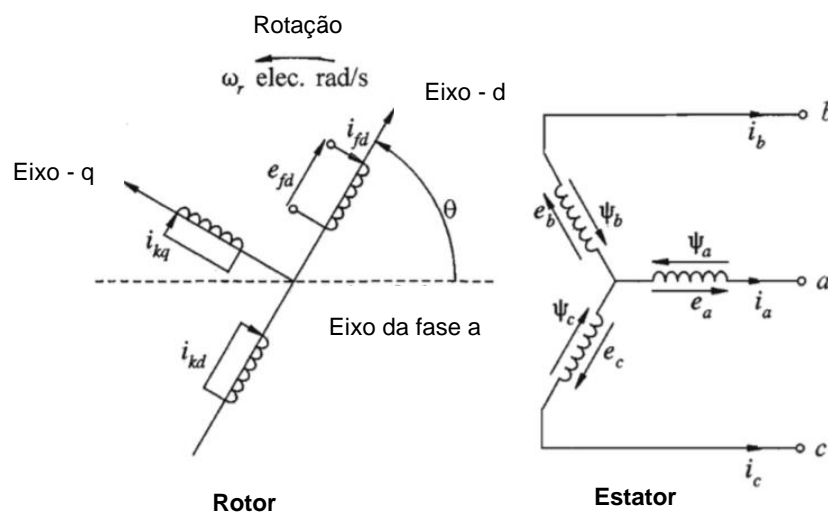
Já o rotor é a peça do gerador síncrono que está conectada o eixo girante externo. Possui o enrolamento de campo e o amortecedor, é suportado por mancais

e pode ser constituído pelos lisos ou salientes. (ARAÚJO, 2011; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

Dessa forma, a máquina síncrona pode ser modelada em duas partes separadamente, o seu sistema mecânico e seu sistema elétrico. Todavia é necessário fazer algumas considerações: a histerese e a saturação magnética são desprezíveis e os enrolamentos do estator estão distribuídos ao longo do entreferro e a posição do eixo em quadratura está adiantada de 90 graus em relação ao direto. (ARAÚJO, 2011; KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

Na Figura 6 a posição dos elementos do rotor e do estator da máquina síncrona são mostradas.

Figura 6. Circuito representando o estator e o rotor da máquina síncrona



Fonte: Adaptado de Kundur, Balu e Lauby (1994).

Onde:

i_a, i_b, i_c = Correntes do estator [A];

e_a, e_b, e_c = Tensões de fase do estator [V];

Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c = Enlaces de fluxo dos enrolamentos do estator [Wb];

e_{fd} = Tensão de campo [V];

i_{fd}, i_{kq}, i_{kd} = Correntes de campo e dos amortecedores [A];

θ = Diferença angular entre o eixo direto e os enrolamentos da fase a [rad];

ω_r = velocidade angular do rotor [rad/s].

Levando em consideração as definições anteriores, a máquina síncrona pode ser equacionada eletricamente com as equações (1), (2), (3), (4), (5) e (6). As equações de enlaces de fluxos são a variação do fluxo no tempo nas espiras, entretanto o aprofundamento de como esses enlaces são formados e delineados não são apresentadas nesse documento, pois não faz jus ao escopo do trabalho a definição dessas equações. Elas foram estudadas na obra de Kundur, Balu e Lauby (1994). (ARAÚJO, 2011; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

$$e_a = \frac{d\Psi_a}{dt} + R_a * i_a \quad (1)$$

$$e_b = \frac{d\Psi_b}{dt} + R_a * i_b \quad (2)$$

$$e_c = \frac{d\Psi_c}{dt} + R_a * i_c \quad (3)$$

Onde:

R_a = Resistencia de armadura [Ω];

As equações (1), (2) e (3) são equações da tensão terminal de cada fase. Através delas é possível saber que dependem da variação dos enlaces de fluxo no tempo somados com as perdas na resistência de armadura, ou seja, as perdas internas do gerador.

$$e_{fd} = \frac{d\Psi_{fd}}{dt} + R_{fd} * i_{fd} \quad (4)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{kd}}{dt} + R_{kd} * i_{kd} \quad (5)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{kq}}{dt} + R_{kq} * i_{kq} \quad (6)$$

Onde:

R_{fd} , R_{kd} , R_{kq} = Resistências do rotor [Ω];

Ψ_{fd} , Ψ_{kd} , Ψ_{kq} = Enlaces de fluxo dos enrolamentos do estator [Wb];

As equações (4), (5) e (6) são referentes à relação entre os enlaces de fluxo do estator e à tensão e corrente de campo.

Somente com as equações de (1) a (6) e as equações de enlace de fluxo, se torna muito complexo definir um ponto de operação da máquina. Sendo assim, segundo Kundur, Balu e Lauby(1994), com transformação dq0 que faz a relação entre as três fases com o eixo direto, em quadratura e sequência zero, são obtidas as equações (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14) e (15). Segundo Araújo (2011) “a maior vantagem da transformação dq0 está em tornar as indutâncias da máquina independentes da posição do rotor”. A definição e métodos matemáticos para se chegar nas equações com a transformação dq0, não estão contempladas no trabalho, pois fogem do escopo do mesmo.

$$e_d = \Psi_q * \frac{d\Psi_d}{dt} + \frac{d\theta}{dt} + R_a * i_d \quad (7)$$

$$e_q = -\Psi_d * \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\Psi_q}{dt} + R_a * i_q \quad (8)$$

$$e_0 = \frac{d\Psi_0}{dt} + R_a * i_0 \quad (9)$$

Onde:

i_d, i_q, i_0 = Correntes do estator [A];

e_d, e_q, e_0 = Tensões de fase do estator [V];

Ψ_d, Ψ_q, Ψ_0 = Enlaces de fluxo próprios dos enrolamentos do estator [Wb];

As equações (7), (8) e (9) definem as tensões de eixo direto, em quadratura e sequência zero. Pode-se observar que a de sequência zero é a única que não depende do ângulo entre a fase “a” e o ângulo do eixo direto. Elas dependem dos enlaces do eixo de quadratura e de sequência zero, que estão disposto nas equações (10), (11) e (12).

$$\Psi_d = L_d * i_d + L_{afd} * i_{fd} + L_{akd} * i_{kd} \quad (10)$$

$$\Psi_q = L_q * i_q + L_{akq} * i_{kq} \quad (11)$$

$$\Psi_0 = L_0 * i_0 \quad (12)$$

Onde:

L_d, L_q, L_0 = Indutâncias próprias dos enrolamentos do estator [H];

$L_{afd}, L_{akd}, L_{akq}$ = Indutâncias mútuas entre os enrolamentos do estator e do rotor [H];

As equações (10), (11) e (12) são as definições do enlace de fluxo do eixo direto, em quadratura de sequência zero em relação às indutâncias do estator e as indutâncias mútuas do estator e o rotor.

$$\Psi_{fd} = \frac{3}{2} * L_{afd} * i_d + L_{ffd} * i_{fd} + L_{fkd} * i_{kd} \quad (13)$$

$$\Psi_{kd} = \frac{3}{2} * L_{akd} * i_d + L_{fkd} * i_{fd} + L_{kkd} * i_{kd} \quad (14)$$

$$\Psi_{kq} = \frac{3}{2} * L_{akq} * i_q + L_{kkq} * i_{kq} \quad (15)$$

Onde:

$\Psi_{fd}, \Psi_{kd}, \Psi_{kq}$ = Enlaces de fluxo próprios dos enrolamentos do rotor [Wb];

$L_{ffd}, L_{kkd}, L_{kkq}$ = Indutâncias próprias dos enrolamentos do rotor [H];

L_{fkd} = Indutâncias mútuas entre os enrolamentos de campo e amortecedor no eixo direto [H].

As equações (13), (14) e (15) são os enlaces dos enrolamentos do rotor, onde também são relacionadas as indutâncias mútuas entre os enrolamentos do rotor e estator e as indutâncias mútuas do enrolamento de campo e amortecedor.

Além das equações referentes à modelagem eletromagnética, a máquina síncrona também possui uma parte de seu equacionamento referente ao seu movimento mecânico e sua interação com as características elétricas da máquina. O modelo mecânico da máquina síncrona, segundo Kundur, Balu e Lauby (1994), pode ser demonstrado com base nas equações (16), (17), (18) e (19).

$$T_m = T_e + T_a \quad (16)$$

$$T_e = \frac{3p}{2} (\Psi_d * i_q - \Psi_q * i_d) \quad (17)$$

$$T_a = J * \frac{d\omega_m}{dt} \quad (18)$$

$$T_m = \frac{3p}{2} (\Psi_d * i_q - \Psi_q * i_d) + J * \frac{d\omega_m}{dt} \quad (19)$$

Onde:

T_m = Torque mecânico [N.m];

T_e = Torque eletromagnético [N.m];

T_a = Torque de aceleração [N.m];

ω_m = Velocidade angular do rotor [rad.mec./seg];

J = Momento de inércia da máquina [kg.m²];

p = Número de pólos da máquina.

A equação (16) relaciona o torque mecânico, eletromagnético e de aceleração, sendo assim o torque eletromagnético apresentado na equação (17) é depende do número de pólos e dos enlaces de fluxo e das correntes de eixo direto e eixo de quadratura. O torque de aceleração depende do momento de inércia da máquina e da variação da velocidade angular do rotor mostrados na equação (18). Através dessas três equações pode-se definir o torque mecânico na equação (19). Com isso, conclui-se que os torques mecânico e eletromagnético são iguais até que haja alguma perturbação. Essa perturbação causará uma variação da velocidade angular do rotor e com isso um torque acelerante, que promoverá perturbação na frequência, podendo causar a retirada da máquina do sistema. (ARAÚJO, 2011; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

De um modo geral, o comportamento da máquina síncrona é mostrado através das equações elencadas nessa seção. Entretanto, para a operação no sistema de geração de energia, é necessário a utilização de controladores. Esses controladores farão com que a energia elétrica produzida na saída do gerador tenha níveis de tensão e frequência adequados. Os reguladores utilizados são os de velocidade (RV) e os reguladores de tensão (RT).

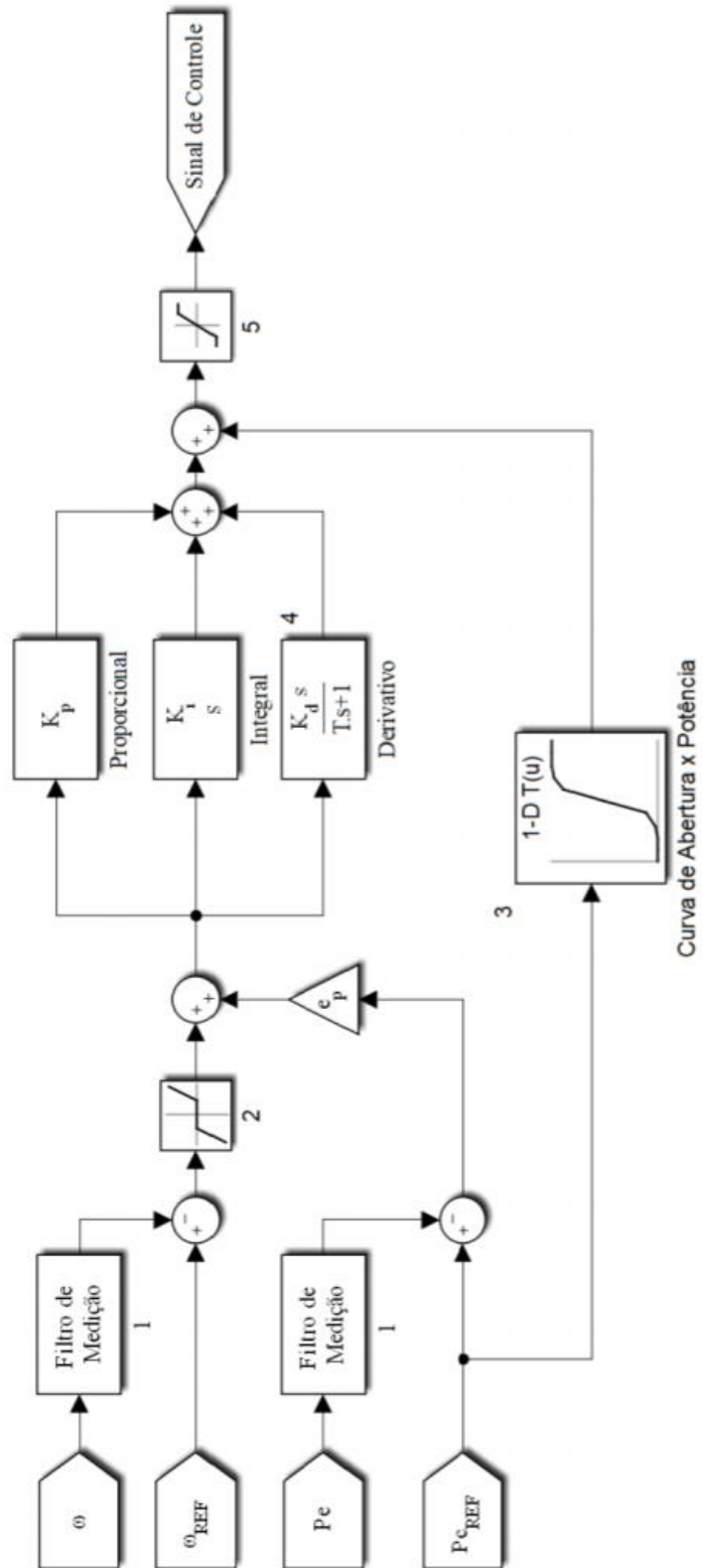
2.3.1 Reguladores de Velocidade - RV

O regulador de velocidade (RV) é responsável pelo controle da velocidade do rotor, a partir do controle da abertura do distribuidor e da movimentação das pás ou agulhas, dependendo do tipo de turbina que está sendo utilizado.

“O regulador de velocidade é um dispositivo de controle que visa garantir o equilíbrio dinâmico da máquina. Ele compara o sinal de velocidade angular do eixo com o valor que este foi ajustado para ter. Se houver alguma diferença entre esses dois valores, é gerado um sinal de erro que será processado pelos dispositivos eletrônicos. Esses dispositivos são regulados para dar o comando adequado para as válvulas que controlam o fluxo de óleo para os servo-motores que atuam nas posições angulares das palhetas diretrizes do distribuidor e nas pás do rotor, ajustando novamente a velocidade angular. As válvulas, em geral, são do tipo proporcional, ou seja, o fluxo de óleo para os servo-motores é proporcional à intensidade do sinal do regulador.” (YAMASHITA, 2019.p.22. apud SANTOS, 2012).

O RV é um controlador de velocidade angular do rotor, sendo diretamente relacionado a frequência e a potência ativa gerada. Nesse regulador é utilizado um sistema realimentado, onde se percebe a variação da potência e da velocidade angular, em relação as referências impostas pelo RV. A diferença é ajustada com uma malha de controle Proporcional-integrador-derivativo (PID). Tendo como saída um sinal de controle, como pode ser observado na Figura 7. (YAMASHITA, 2019; SOUZA, 2020; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

Figura 7. Controlador de velocidade de um RV.



Fonte: Souza (2020).

No sistema de controle de velocidade do RV (Regulador de velocidade), no ponto 1 tem-se os filtros de medição que são para eliminar os ruídos do sinal de entrada. Os dados de entrada são a velocidade angular e a potência ativa elétrica. Esses valores de entrada são os reais e as referências do RV. A diferença das grandezas de referência e de entrada é utilizada como entrada no controlador PID e somadas com o sinal da curva de abertura potência do sistema, tendo como saída o sinal de controle do RV. Com isso, é controlado o distribuidor e posição das pás ou agulhas. Isso ocorre com o intuito de manter o controle da frequência da máquina e da potência ativa gerada. (YAMASHITA, 2019; SOUZA, 2020; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

Os RV que são feitos atualmente levam em consideração as recomendações da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) e do Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE). Estes documentos utilizados como referência são: IEEE std 1207™ - 2011, IEEE std 125™ - 2007 e IEC 61362 - 2012.

Em complemento a utilização dos reguladores de velocidade em sistemas de geração de energia elétrica, temos os reguladores de tensão (RT). A máquina síncrona é controlada por esses dois tipos de reguladores.

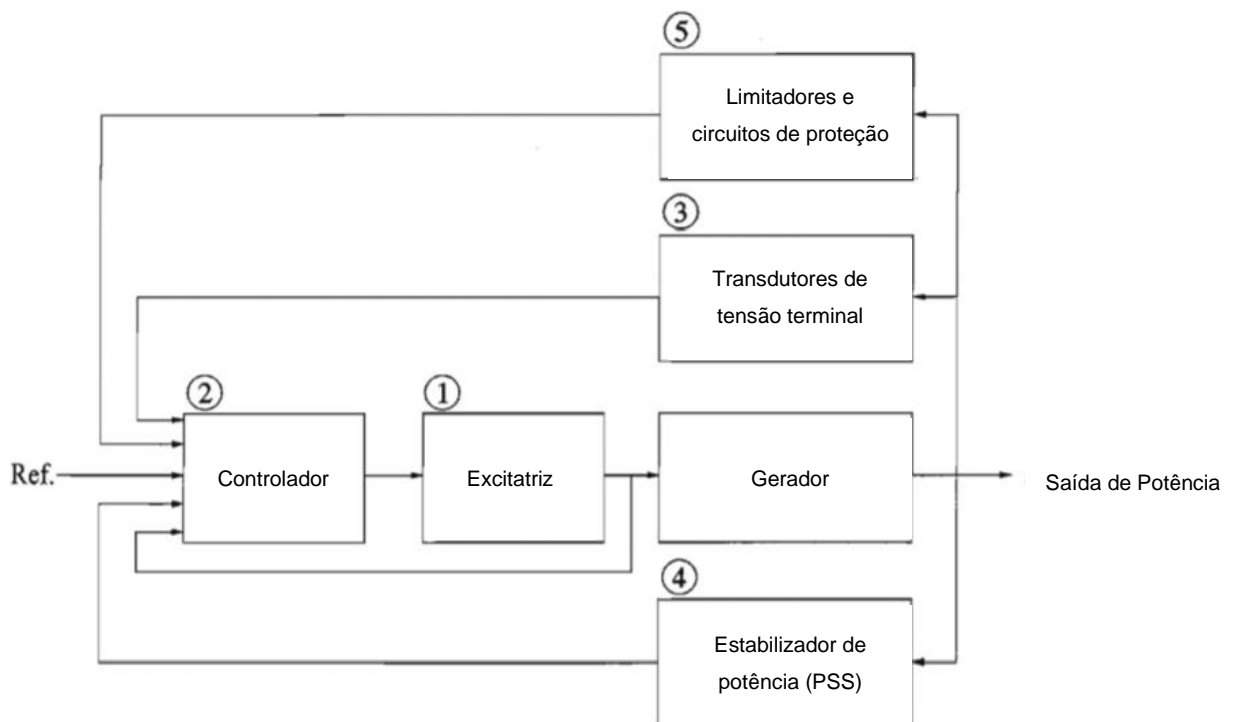
2.3.2 Reguladores de Tensão - RT

O regulador de tensão (RT) é responsável pelo controle do sistema de excitação do gerador e sua principal função é manter a tensão nos terminais do gerador em valores próximos da referência. Os RT's controlam a corrente de campo da máquina síncrona, ajustando assim tensão terminal do gerador. Esse regulador é utilizado para outras funções além de somente controlar a tensão terminal. Ele é composto por limitadores e sistemas de controles auxiliares que auxiliam o sistema de proteção do gerador e pode ser utilizado para estabilização dos transientes. (KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

Uma das formas de estruturação do RT é em diagramas de blocos, como pode ser visualizado na Figura 8. O bloco 1 refere-se ao sistema de excitação, normalmente feito com tiristores. O sistema de controle, também conhecido em inglês por *automatic voltage regulator* (AVR), pode ser observado no bloco 2. Ele é

responsável pelo controle dos tiristores. O bloco 3 é responsável pelos transdutores que realimentam o AVR com os dados mais atualizados do sistema. O bloco 4, que é o principal objeto desse trabalho, é o estabilizador de potência, também conhecido como *power system stabilizer* (PSS). Por fim, o bloco 5 são os limitadores que são utilizados em conjunto com o sistema de proteção do gerador. (KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

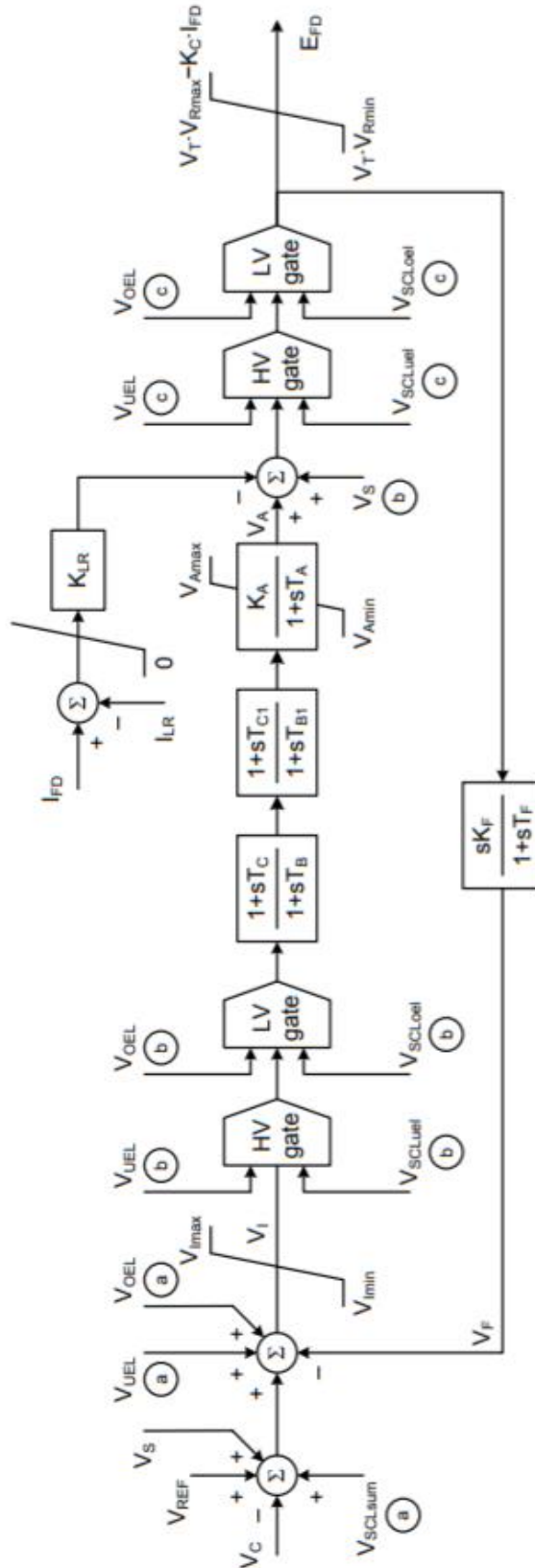
Figura 8. Diagrama de bloco do funcionamento do RT.



Fonte: Adaptado de Kundur, Balu e Lauby (1994).

O bloco 2, da Figura 8, é responsável pelo controle do sistema de excitação da máquina síncrona. Esse sistema depende do tipo de sistema de excitação utilizado. Entretanto, a IEEE stdTM 421.5 é utilizada como referência para diversos tipos de sistemas de excitação pelos fabricantes desses controladores e é referência nesse estudo. Um exemplo é o modelo ST1C, apresentado na Figura 9. Esse modelo é uma referência que pode ser adaptada, conforme necessidade. (KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

Figura 9. Modelo de AVR ST1C.



Fonte: IEEE (2016).

Na Figura 9, pode ser observado como entrada a tensão terminal. Esta é advinda do transdutor, sinal esse que é reduzido por um transformador de potencial. Além do retorno da tensão também pode ser observado como entrada sinais de limitadores, vindo do bloco 5, mostrado na Figura 8. Entretanto, esses limitadores estão aparecendo duas vezes na Figura 9. Isso é devido ao fato da necessidade de verificar qual tipo de controle o usuário deseja utilizar para os limitadores. É possível escolher entre a entrada utilizando-se um bloco somador ou o sinal de entrada com um bloco seletor. (FERNANDES, 2011; SAKRAN, 2018; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

Os limitadores são controladores, localizados no bloco 5 da Figura 8. Cada limitador possui uma função, restringindo a área de funcionamento da máquina na curva de capacidade. Além disso, os limitadores são utilizados como primeira proteção, evitando que a máquina acione alguma proteção física. Com isso reduzindo o desgaste na máquina e o sistema de proteção da usina. (FERNANDES, 2011; SAKRAN, 2018; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

Os principais limitadores utilizados são:

“o limitador de subexcitação, cuja função é manter uma excitação mínima no gerador para prevenir instabilidade ou o aquecimento da região final do núcleo do estator; o limitador de sobre-excitação, que tem por objetivo evitar sobrecorrente de excitação da máquina por um tempo excessivo, protegendo-a de sobreaquecimento; e o limitador Volt/Hetz usado para proteger o gerador de um fluxo magnético excessivo devido à baixa frequência ou sobretensão. Há ainda um elemento de proteção contra curto-circuito de campo: ele basicamente fornece um caminho para que a corrente negativa de campo (devido ao curto-circuito do sistema ou deslizamento dos polos do gerador) possa fluir.” (FERNANDES, 2011).

Por fim, o estabilizador de potência ou controlador power system stabilizer (PSS), que é o tema principal de estudo do presente trabalho, será melhor apresentado no capítulo 3.

3 PSS

O estabilizador de potência ou *power system stabilizer* (PSS), tem basicamente a função de amortecer as oscilações no rotor do gerador, controlando sua excitação utilizando sinais de estabilização auxiliares. Para isso, é adicionado um sinal no regulador de tensão (RT) com o intuito de amortecer as oscilações do sistema de potência. Em situações de grandes perturbações o RT ajuda a fornecer torque de sincronização, com isso diminui o torque de amortecimento. Ao adicionar o PSS ao RT, o torque de amortecimento é colocado em fase com a velocidade angular do rotor, assim reduzindo a oscilação de potência e frequência, tornando o sistema mais estável. (CAIQIN, CHENGQIU, CHENGJUN, 2009; FERNANDES, 2011; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

O PSS é bastante utilizado em grandes perturbações, porém, pode também ser útil para amortecer pequenas oscilações. Estas estão entre variações de potência e tensão graduais que acontecem comumente no sistema elétrico de potência. Além das utilizações já expostas do PSS ele também é capaz de compensar atrasos no sistema de excitação, advindo de elementos com baixo desempenho dinâmico. (CAIQIN, CHENGQIU, CHENGJUN, 2009; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

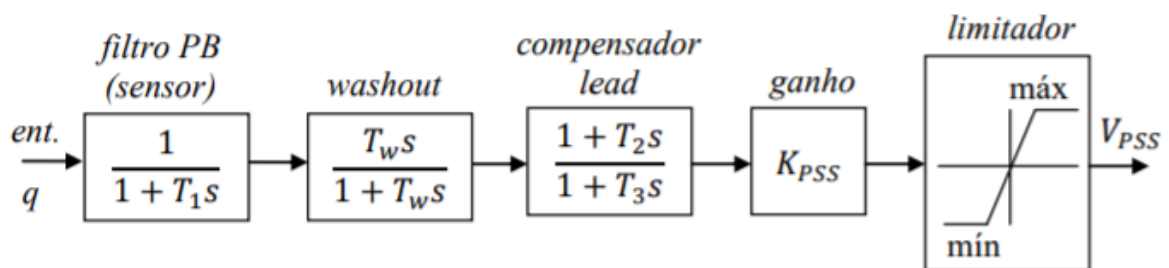
Esse modelo de controlador, em estudo, melhora a estabilidade da máquina síncrona ajustando a tensão terminal, por meio da corrente de campo induzida. É de conhecimento público que vários modelos de PSS existem, sendo que, as diferenças entre os modelos estão no número de entradas, nos sinais de entrada e na composição interna do controlador. Os principais conjuntos de sinais utilizados como entrada no PSS são o desvio da velocidade do rotor, o desvio da velocidade do rotor junto a potência elétrica, o terceiro mais utilizado é o sinal de medição da frequência. (FERNANDES, 2011; MOHANDÉS, ABDELMAGID, BOIKO, 2018; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

Ao realizar o projeto de um PSS é necessário saber quais os sinais de entrada que serão utilizados e modelo do controlador, pois, segundo Fernandes (2011) “para projetar um PSS é necessário o conhecimento da estrutura e parâmetros do regulador de tensão. Se for mal projetado, o estabilizador pode adicionar

oscilações indesejadas ao sistema”. (FERNANDES, 2011; MOHANDES, ABDELMAGID, BOIKO, 2018; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

O PSS, independente do modelo, é composto por 5 blocos de controle, pois, no processo é necessário ter: um filtro de passa baixa, um filtro passa alta, um compensador de fase, o ganho e o limitador de saída. Esses elementos básicos para um PSS podem ser visualizados na Figura 10. (FERNANDES, 2011; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

Figura 10. Diagrama de blocos de um PSS.



Fonte: Fernandes (2011).

Como já disposto anteriormente, a entrada de sinal observada na Figura 10 é passível de escolha, sendo que o primeiro bloco é um filtro passa-baixa, que segundo Fernandes (2011), “é utilizado para limitar o efeito do ruído de alta frequência e as oscilações torcionais”.

O bloco de Washout é um filtro passa-alta, com a constante de tempo T_w do tamanho necessário para permitir a passagem dos sinais referentes à oscilação da velocidade angular do rotor. Todavia, esse filtro impede que um desvio permanente altere a tensão de campo da máquina. A principal consideração que se deve ter é que T_w seja longo o suficiente para passar sinais de estabilização de frequências, mas não tanto a ponto de levar a condições indesejadas de tensão, quando em sistemas isolados. (CAIQIN, CHENGQIU, CHENGJUN, 2009; FERNANDES, 2011; KAHOU LI, GUESMI, ABDALLAH, OUALI, 2009; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

O terceiro bloco é o compensador lead ou compensador de fase. Este é representado por um bloco de avanço-atraso. É utilizado para compensar o atraso de fase entre a entrada da excitatriz e o torque elétrico do gerador. Essa compensação de fase deve ser configurada para que possa ser aceitável em diferentes condições do sistema. Também é necessário que haja alguma subcompensação de fase, pois,

isso acarreta em um aumento no torque de amortecimento, além de um pequeno aumento no torque de sincronização. (CAIQIN, CHENGQIU, CHENGJUN, 2009; FERNANDES, 2011; KAHOULI, GUESMI, ABDALLAH, OUALI, 2009; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

O Quarto bloco é o ganho do *power system stabilizer* (PSS). Nele é definido o quanto de amortecimento será inserido no *automatic voltage regulator* (AVR) pelo PSS. O ganho deve ser ajustado para introduzir no gerador o máximo de amortecimento possível. No entanto, é realizado um ajuste para que o PSS resulte em um amortecimento em modos críticos de operação sem comprometer modos comuns de operação com ruídos. (CAIQIN, CHENGQIU, CHENGJUN, 2009; FERNANDES, 2011; KAHOULI, GUESMI, ABDALLAH, OUALI, 2009; KUNDUR, BALU, LAUBY, 1994).

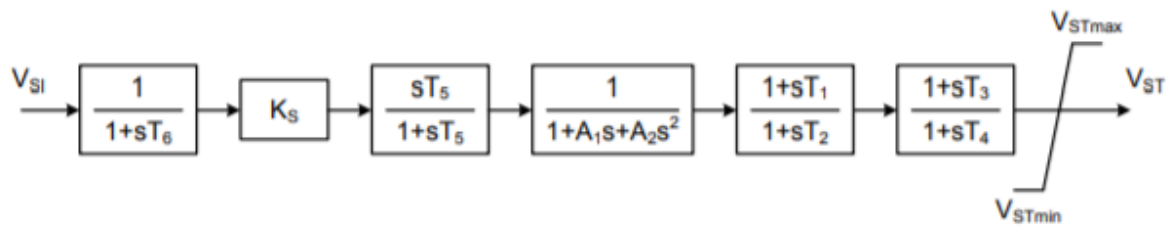
Por fim, o último bloco é o limitador de máximo ou mínimo sinal de PSS inserido no sistema. Com isso evitando a interferência excessiva do PSS no AVR. Além da tipologia básica apresentada neste capítulo, o PSS pode ser configurado de diferentes formas, sem perder seus elementos básicos já citados.

3.1 Tipologias de PSS

O documento IEEE std™ 421.5 engloba recomendações para modelagem de sistemas de excitação, bem como suas nomenclaturas. Nele pode ser encontrada várias configurações de AVR e tipologias diferentes de PSS. Os tipos de PSS são diferenciados por meio do número e a versão é diferenciada por letras. Exemplo: PSS1A e PSS1C. Estes possuem a mesma tipologia, entretanto com uma pequena atualização em algum ponto de sua composição. Porém, é importante salientar que não necessariamente o modelo PSS8A será melhor do que o modelo PSS2A. Ambos podem desenvolver papéis semelhantes no sistema, isso depende da situação ao qual será submetido.

A Figura 11, a Figura 12 e a Figura 13 são três tipos diferentes de PSS apresentados no documento IEEE std™ 421.5. Estes são, respectivamente: PSS1A, PSS2C e PSS4C.

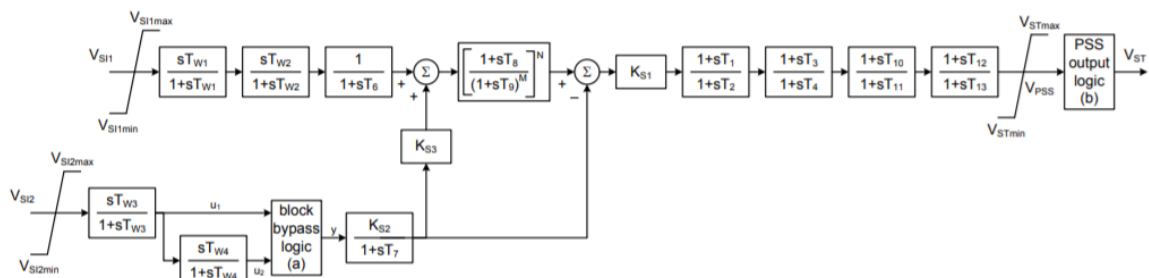
Figura 11. PSS1A com uma entrada.



Fonte: IEEE (2016).

O PSS1A da Figura 11 é um modelo com uma única entrada e com um menor número de blocos de controle dentre os modelos apresentado no documento base da IEEE.

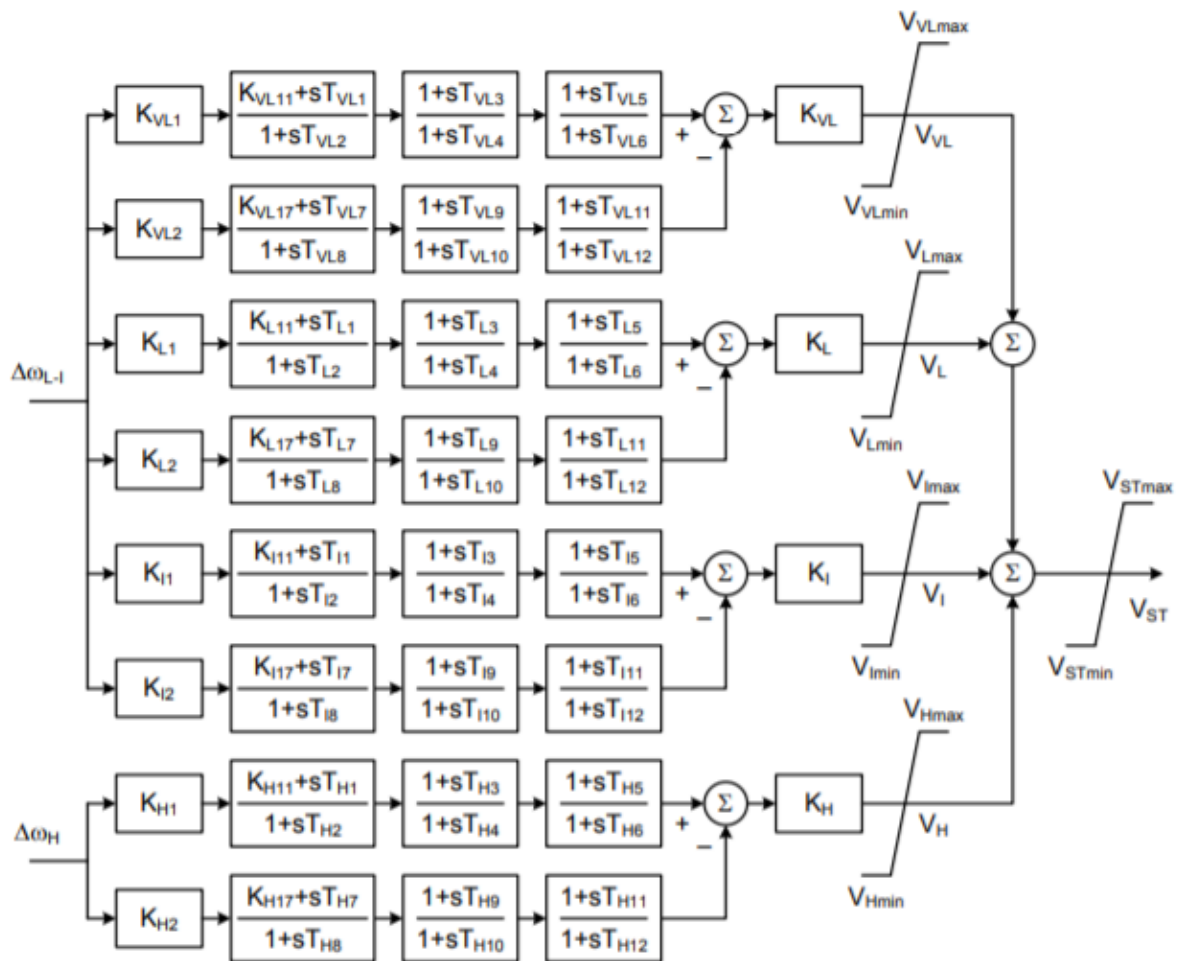
Figura 12. PSS2C com duas entradas.



Fonte: IEEE (2016).

O PSS2C, apresentado na Figura 12, possui duas entradas e é acrescido de mais itens de configuração. Ele possui o mesmo sinal de saída dos demais PSS's.

Figura 13. PSS4C com multi-band



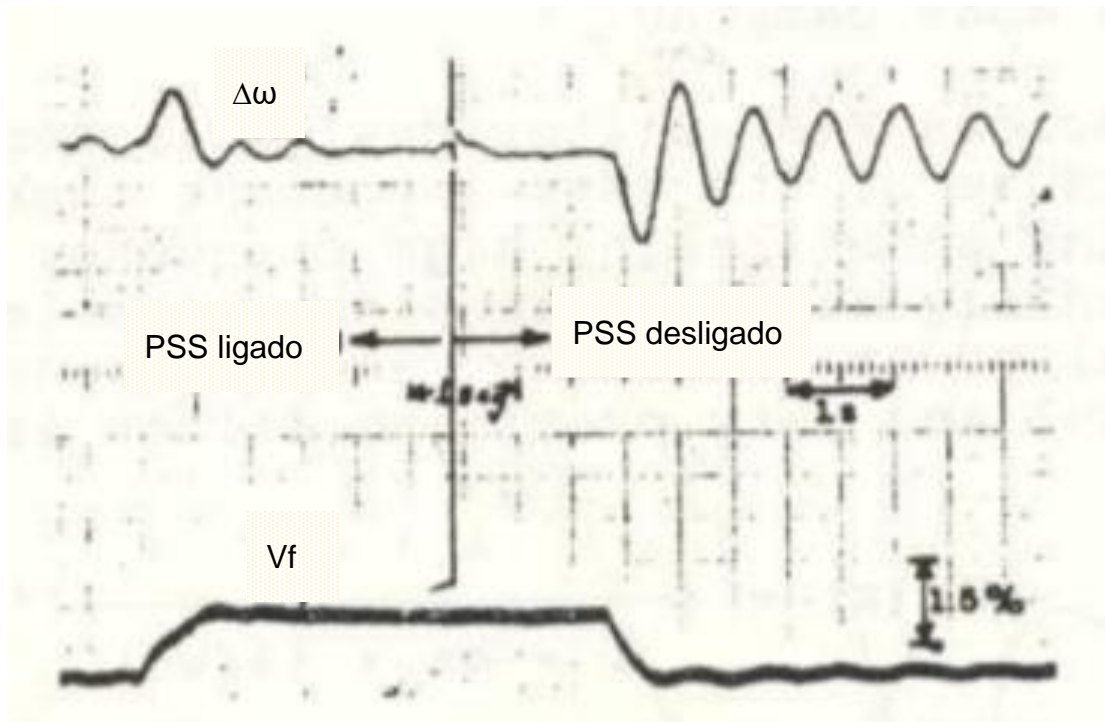
Fonte: IEEE (2016).

O PSS4C, visto na Figura 13, possui duas entradas. Com isso, é considerado multibanda, pois, separa os filtros para sinais de muito baixa, baixa, média e alta frequência.

É possível notar que há diferença entre cada tipo de *power system stabilizer* (PSS) apresentados na Figura 11, na Figura 12 e na Figura 13. Apesar dessa diferença todos possuem a mesma saída e a mesma função, porém, métodos diferentes de resolução do problema. Todos os modelos de PSS do documento da IEEE já foram utilizados em simulações e comprovaram sua eficiência. Além disso, já foram inseridos em reguladores de tensão e testados em situações reais. Esse estudo foi realizado por Soares e Zeni (1985). Ele trata da inserção de PSS baseado no modelo PSS2A, na usina hidroelétrica de Salto Osório (UHSO).

Os resultados obtidos por Soares e Zeni (1985) foram satisfatórios, com a potência ativa sendo rapidamente estabilizada com a inserção de uma perturbação. Nesse caso a perturbação foi um degrau de tensão, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14. Gráfico da potência ativa e da tensão terminal dado um degrau de tensão na UHSO.

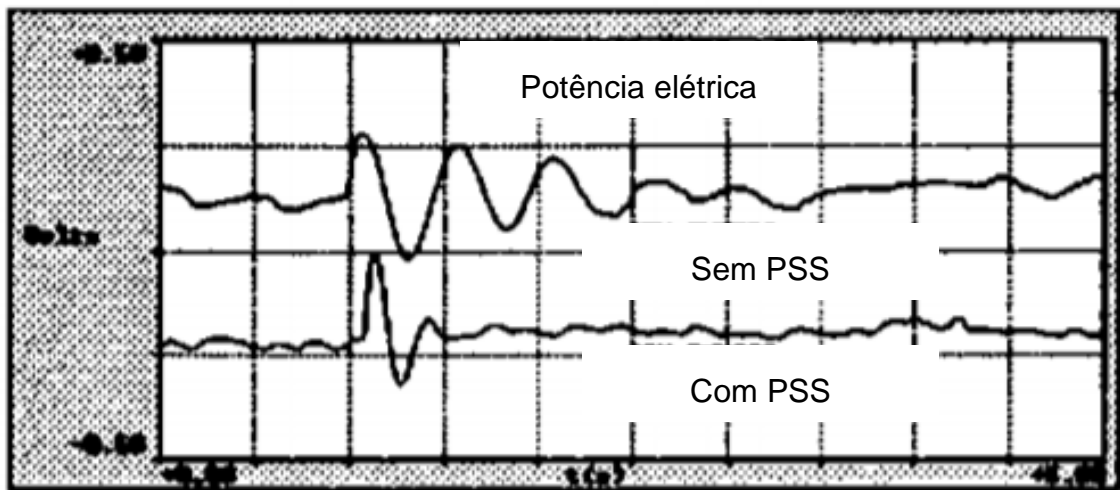


Fonte: Soares e Zeni (1985).

Com a perturbação inserida no sistema pode-se observar o gráfico da Figura 14 e constatar a eficiência do *power system stabilizer* (PSS) no controle da potência ativa de saída do gerador nesse estudo de caso. Na análise do gráfico, no seu lado direito, com o PSS desligado e quando há uma perturbação, a variação da potência é maior e mais duradoura. No lado esquerdo do gráfico, com o PSS ligado, nota-se uma amortização na oscilação da potência. Com a potência em níveis normais o sistema tende a manter seu comportamento dentro dos parâmetros desejado. Com isso é comprovada a eficiência do PSS.

Outro estudo de caso realizado por Soares, Arione e Pons (1995), no sistema elétrico colombiano, onde foi utilizado o PSS2C possui seus resultados apresentados na Figura 15.

Figura 15. Variação da potência ativa no fechamento de linhas de transmissão ligadas a usina

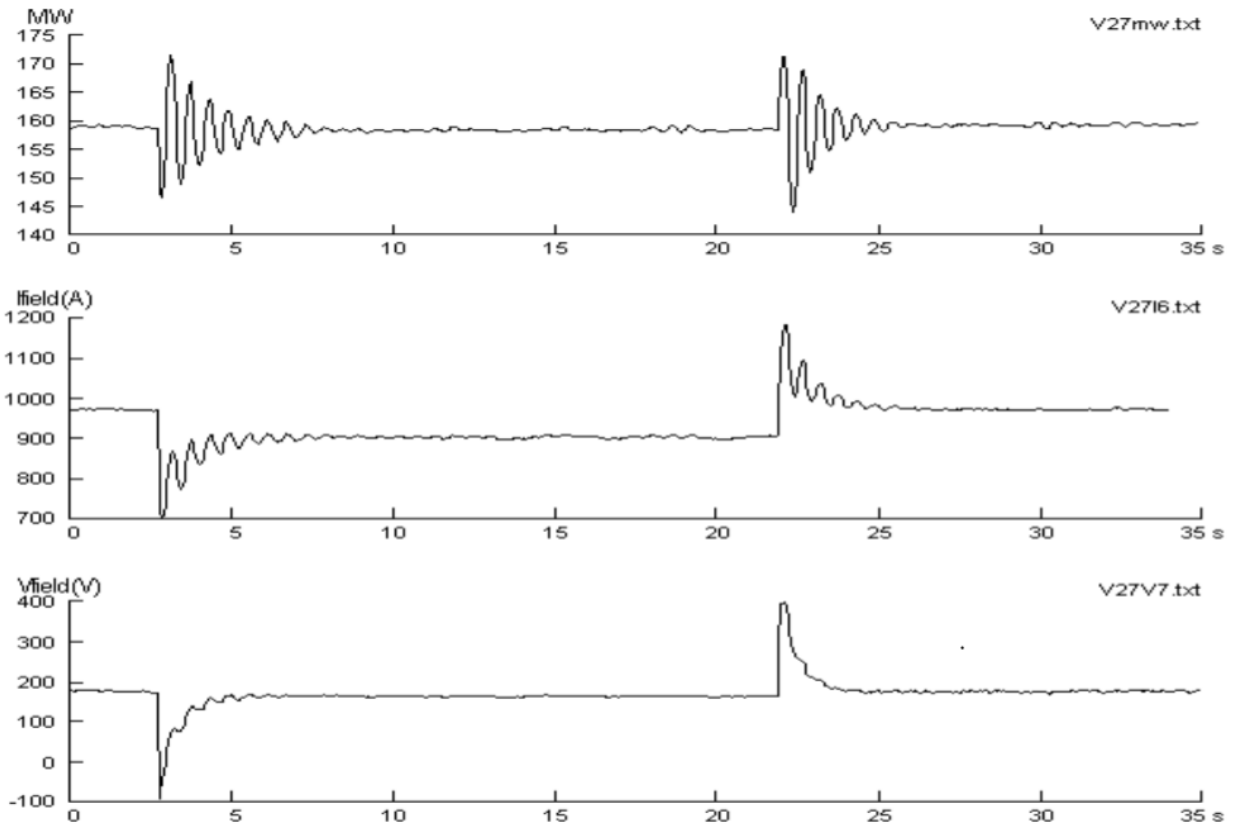


Fonte: Soares, Arione e Pons (1995).

A Figura 15 apresenta o resultado da potência elétrica com o fechamento de uma linha de transmissão conectada na usina estudada. Nesta figura, o resultado da linha de cima é sem o PSS e a linha abaixo com o PSS. O estudo apresenta uma rápida estabilização com esse tipo de oscilação. Uma conclusão interessante abordada pelos autores é a facilidade dos ajustes para conseguir os devidos amortecimentos. É notório que com a inserção do PSS o sistema gera uma resposta semelhante, tendo as potências em níveis normais de uma forma mais rápida com a inserção do PSS. Sendo assim, comprovando a eficiência do mesmo nesse segundo estudo.

Por fim, a terceira simulação foi realizada pela ABB, documentada por Gu (2015), em uma modernização de uma usina, à qual não foi divulgada, utilizado o modelo de PSS2C. A Figura 16 e a Figura 17 apresentam o resultado da utilização do PSS.

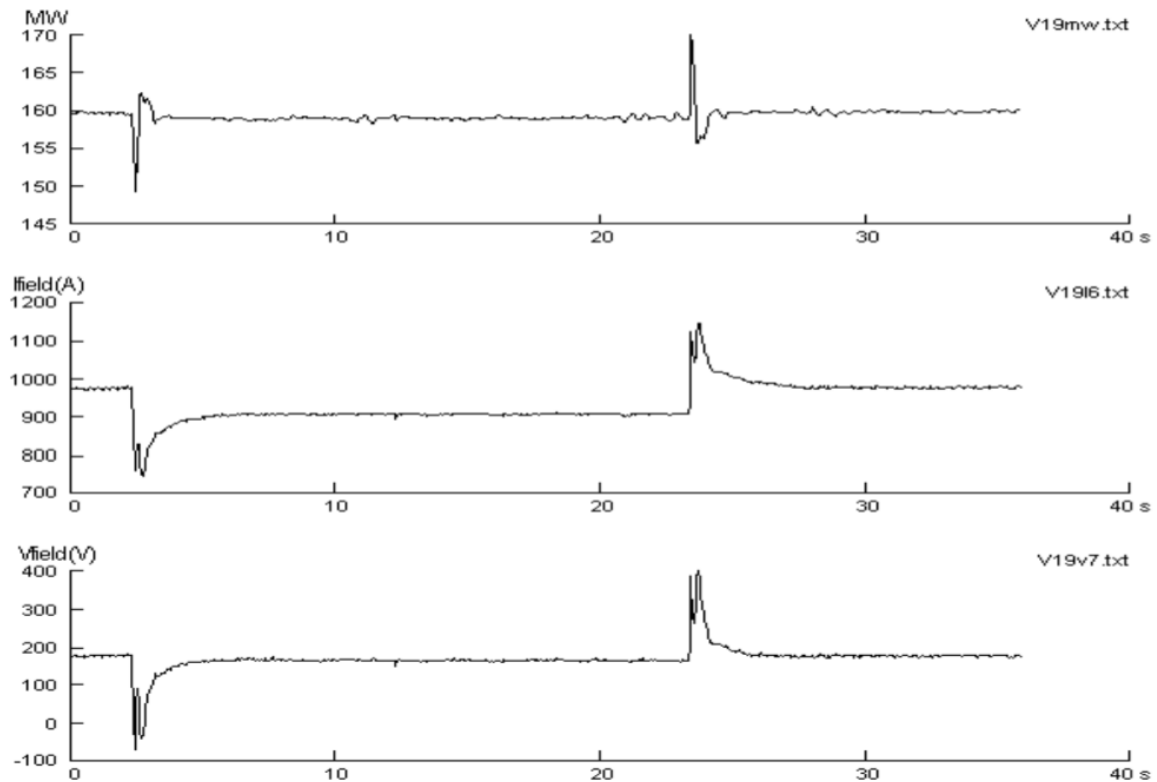
Figura 16. Curvas da aplicação da ABB sem PSS



Fonte: Gu (2015).

As curvas apresentadas na Figura 16 são da potência ativa, corrente de campo e tensão de campo, respectivamente de cima para baixo. A oscilação observada, em todas as curvas, foi um degrau de 5% na tensão de campo. É possível notar uma grande oscilação da potência ativa, demorando no retorno ao regime permanente. As respostas são sem a inserção do PSS.

Figura 17. Curvas da aplicação da ABB com PSS



Fonte: Gu (2015).

A Figura 17 apresenta a reação do sistema com um degrau de tensão de campo com a utilização do PSS, que é referente ao mesmo caso apresentado na Figura 16. A resposta do sistema, que pode ser observada pelas curvas, é de que há uma amortização da potência ativa retornando ao transitório rapidamente. Entretanto, há uma modificação na curva de tensão e corrente de campo. Isso é uma consequência da utilização do PSS.

Os diferentes tipos de PSS existentes se mostram eficazes tanto em simulações computacionais como em sistemas reais. A resposta observada é de que a potência ativa possui sua variação amortizada. Isso é benéfico ao sistema pois causa perturbações menores e por tempos reduzidos, sendo assim, não retirando a máquina de operação. Com a eficiência do PSS já comprovada, este estudo elabora um modelo e realiza uma simulação a fim de verificar diferentes tipos de perturbação no sistema, estes são apresentados no capítulo 4.

4 MODELO E RESULTADOS

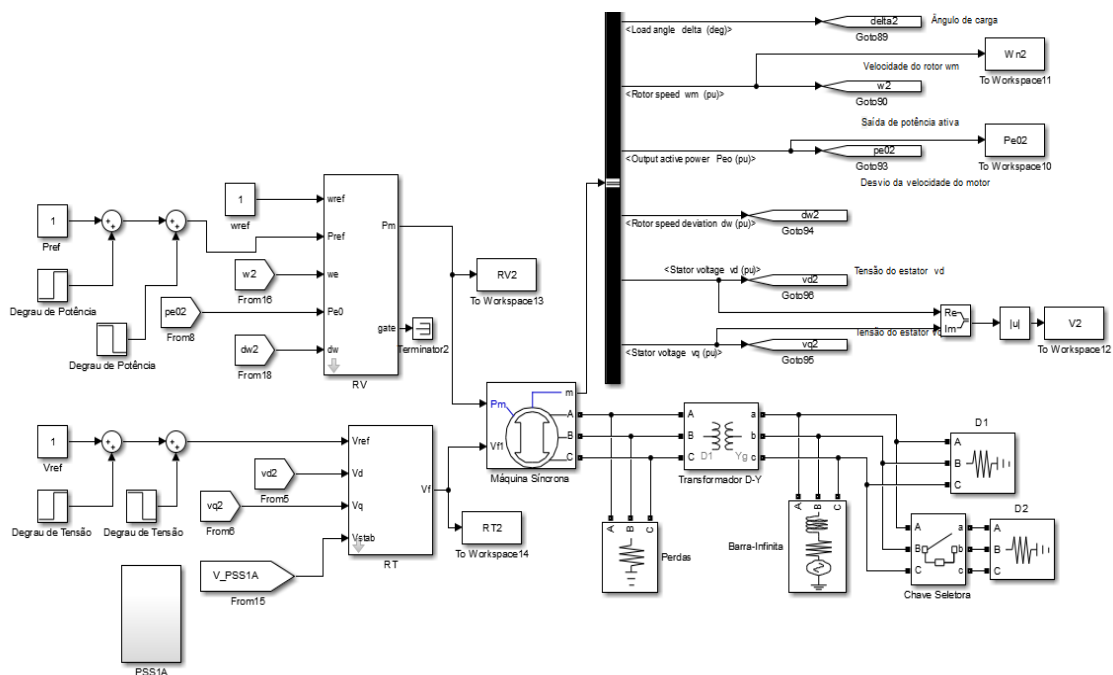
A proposta desse trabalho é a apresentação dos efeitos da utilização do *power system stabilizer* (PSS) em uma máquina síncrona e não contempla a inserção dos limitadores do RT. Para a obtenção dos dados necessários para a validação das simulações foi utilizado o software MATLAB/Simulink.

O modelo proposto para simulação será apresentado na seção 4.1 e visa simular o funcionamento de uma máquina síncrona ligada a um transformador elevador que se conecta a uma carga e uma barra infinita.

4.1 Modelo Proposto

O modelo de simulação proposto é composto de uma máquina síncrona, uma barra infinita, duas cargas, um transformador, um regulador de tensão (RT), um regulador de velocidade (RV) e uma chave seccionadora. O sistema pode ser visto na Figura 18.

Figura 18. Modelo de simulação de sistema elétrico construído no Matlab/Simulink



Fonte: Elaboração própria (2020).

O modelo tem em sua composição duas demandas, D1 e D2, que são puramente resistivas, de potência constante. As demandas D1 e D2 consomem 200

MW cada, ambas são trifásicas, com tensão nominal de 138 kV e frequência nominal de 60 Hz. Junto à D2 há uma chave seccionadora, utilizada para simular o aumento repentino de demanda. Ainda no lado de alta tensão do sistema, há uma barra-infinita configurada com tensão nominal de 138 kV e frequência nominal de 60 Hz.

Entre o gerador, as demandas e a barra-infinita há um transformador trifásico, com ligação Δ -Y, com níveis de tensão 13,8 kV e 138 kV respectivamente, potência nominal de 1000 MVA e 60 Hz. Outros parâmetros do transformador são resistências de 0,002 pu e reatância de 0,008 pu nos enrolamentos de alta e de baixa e 500 pu de resistência e reatância de magnetização.

A máquina síncrona utilizada é baseada no modelo da máquina 1 da UHE Luiz Carlos Barreto, proposto por Possati (2013). Essa máquina possui pólos salientes e é composta de acordo com os dados da Tabela 1. Tabela de dados do Gerador Síncrono.

Tabela 1. Tabela de dados do Gerador Síncrono.

Dados do Gerador Síncrono			
Grandeza	Valor	Unidade de Medida	Descrição
Potência	200	MVA	Potência Aparente Nominal
Tensão	13,8	kV	Tensão Nominal
Frequência	60	Hz	Frequência Nominal
R_a	0,0028544	pu	Resistência de armadura
H	3,2	s	Inércia
Polos	32	-	Número de polos
X_d	1,305	pu	Reatância síncrona de eixo direto
X'_d	0,296	pu	Reatância transitória de eixo direto
X''_d	0,252	pu	Reatância subtransitória de eixo direto
X_q	0,474	pu	Reatância síncrona de eixo em quadratura
X''_q	0,243	pu	Reatância subtransitória de eixo em quadratura
T'_d	1,01	s	Constante de tempo transitória de eixo direto
T''_d	0,053	s	Constante de tempo subtransitória de eixo direta
T'_{qo}	0,1	s	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em aberto
X_l	0,18	pu	Reatância de dispersão

Fonte: Elaboração própria (2020).

Para o controle do gerador são utilizados um regulador de tensão (RT) e um regulador de velocidade (RV), sendo que ambos os blocos de controle já estão disponíveis em uma biblioteca do Simulink. Como já visto anteriormente, o RV controla a velocidade de rotação da máquina e as configurações inseridas no bloco do RV. A modelagem será apresentada na seção 4.2.5, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Dados de configuração do RV do modelo proposto.

Dados de configuração do RV			
Grandeza	Valor	Unidade de Medida	Descrição
Ka	6	-	Ganho do servo-motor
Kd	0	-	Ganho derivativo
Ki	0,205	-	Ganho integrador
Kp	3	-	Ganho proporcional
Ta	0,1	s	Constante de tempo do servo-motor
Td	0,01	s	Constante de tempo do Filtro de passa-baixa
Tw	2,67	s	Tempo de partida da turbina hidráulica
beta	0	-	Coefficiente de amortecimento da turbina hidráulica
Rp	0,05	-	Queda permanente no loop de feedback
gmin	0,01	pu	Limitador de abertura do distribuidor
gmax	1	pu	Limitador de abertura do distribuidor
vgmin	-0,15	pu/s	Taxa de fechamento do distribuidor
vgmax	0,15	pu/s	Taxa de abertura do distribuidor

Fonte: Elaboração própria (2020).

O RT controla a tensão terminal inserida na máquina. Assim como o RV, o RT utilizado é um bloco disponível no Simulink, que terá sua modelagem apresentada na seção 4.2.6, seguindo as configurações disponíveis na Tabela 3.

Tabela 3. Dados de configuração do RT do modelo proposto.

Dados de configuração do RT			
Grandeza	Valor	Unidade de Medida	Descrição
Ka	300	-	Ganho do Regulador
Ke	1	-	Ganho da representação a excitatriz
Kf	0,001	-	Ganho do filtro de amortecimento
Kp	0	-	Ganho de saída
Ta	0,001	s	Resistência de armadura
Tb	0		Constante de tempo de compensador de fase
Tc	0	s	Constante de tempo de compensador de fase
Te	0	s	Constante de tempo representação a excitatriz
Tf	0,1	s	Constante de tempo do filtro de amortecimento
Tr	0,02	s	Constante de tempo do filtro passa-baixa
Efmin	-15	pu	Limitador de saída
Efmax	15	pu	Limitador de saída

Fonte: Elaboração própria (2020).

O regulador de tensão (RT) tem como componente de controle o PSS, onde é utilizado como estabilizador de potência. A modelagem do PSS utilizado será apresentado na seção 4.2.7 e os itens de configuração estão disponíveis na Tabela 4.

Tabela 4. Dados de configuração do PSS do modelo proposto.

Dados de configuração do PSS			
Grandeza	Valor	Unidade de Medida	Descrição
K	50	-	Ganho
T1	0,15	s	Compensador de fase
T2	0,015	s	Compensador de fase
T5	2,14	s	Washout

Fonte: Elaboração própria (2020).

O modelo foi desenvolvido com a finalidade de apresentar a resposta do sistema diante de alguma perturbação. É analisado o sistema com e sem *power system stabilizer* (PSS), para uma completa visão do comportamento da potência, da frequência e da tensão.

Para realizar as análises, foram efetuadas três perturbações no sistema. A primeira sendo um degrau de tensão, simulando um pedido de aumento de tensão terminal feito pelo órgão regulador, normalmente ligado ao aumento de produção de potência reativa ou elevação de tensão no barramento. Nessa simulação o aumento da tensão terminal foi de 20% da nominal, ou 0,2 pu. A segunda perturbação realizada no sistema é o degrau de potência, representando um aumento de geração de potência ativa pelo gerador, sendo um aumento de 20% da nominal na referência do RV. A terceira simulação é um aumento repentino de demanda no barramento de alta tensão, onde foi inserida a demanda D2 simulando uma inserção repentina de carga no sistema.

Com as proposições para o sistema apresentadas é necessário que haja uma modelagem que represente os elementos propostos. Para uma melhor compreensão do sistema e da proposta apresentada, essa modelagem será apresentada detalhadamente na seção 4.2.

4.2 Modelagem

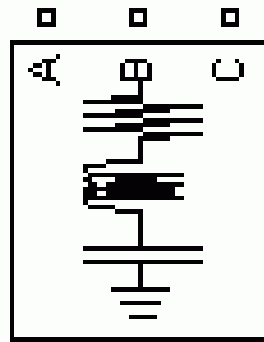
Com os elementos propostos para a elaboração do problema apresentados na seção 4.1, é necessária uma modelagem adequada. As seções a seguir trataram dessa modelagem que será realizada no software Matlab/Simulink.

4.2.1 Modelo da Demanda

No modelo proposto foi utilizado o bloco de carga disponível no Simulink, apresentado na Figura 19. Nesse bloco, segundo Mathworks (2020d), a demanda pode ser configurada de três formas distintas. A primeira forma é a corrente constante, onde a impedância e a potência são alteradas com a variação da tensão. A segunda maneira é a demanda de impedância constante, onde é considerado que ao modificar

os níveis de tensão a corrente e potência sofrem alterações em seus valores. A terceira forma é a demanda de potência constante, que está configurada na simulação do modelo.

Figura 19. Bloco de demanda do Simulink utilizado no modelo proposto.



Fonte: Mathworks (2020d).

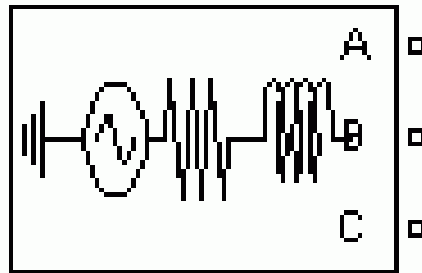
Nessa forma de demanda, a potência ativa e reativa se mantêm constantes no tempo independente das variações de tensão. Foi selecionada a opção de potência constante a fim de simular grandes cargas de potência ativa. A proposição se assemelha a um grande forno industrial puramente resistivo. Este é projetado para manter um consumo alto de potência a fim de manter a temperatura. Este é um exemplo de carga do microssistema que é conectado na barra infinita.

4.2.2 Modelo da barra-infinita

A barra-infinita, segundo Kundur, Balu e Lauby (1994), Barbosa (2013), Faria (2014) e Garcia (2018) é considerada uma barra que mantém tensão e frequência constantes, onde perturbações externas a ela não podem modificar esses parâmetros. A barra-infinita também pode absorver qualquer quantidade de potência ativa e reativa, além de absorver o transitório.

Assim como na demanda, para a barra-infinita foi utilizado um bloco disponível no Simulink. O bloco está configurado para manter uma tensão terminal de 138 kV e uma frequência nominal de 60 Hz. O bloco do Simulink pode ser observado na Figura 20.

Figura 20. Bloco de barra-infinita do Simulink utilizado no modelo proposto.

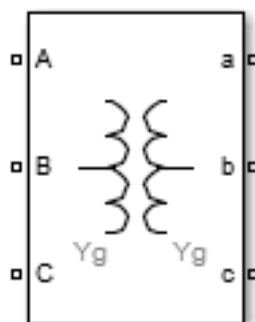


Fonte: Mathworks (2020e).

4.2.3 Modelo do transformador trifásico

O Trafo é um elemento importante no sistema de geração, transmissão e distribuição de energia. Este possui a função de elevar ou abaixar a tensão, contendo elementos eletromagnéticos que são base para sua funcionalidade. Os transformadores possuem a curva de histerese, que é referente à saturação do equipamento. No modelo proposto foi sobredimensionado um transformador para simular um transformador trifásico ideal, que não possui perdas por histerese. Nesse caso, o transformador trifásico utilizado no modelo proposto está disponível no Simulink, sendo representado pela Figura 21. As configurações do transformador estão disponíveis na seção 4.1.

Figura 21. Bloco de transformador trifásico do Simulink utilizado no modelo proposto.



Fonte: Mathworks (2020c).

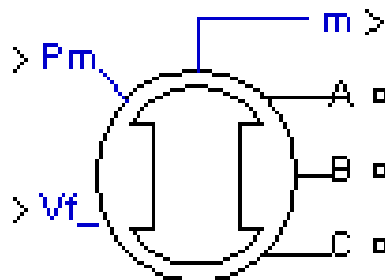
O transformador trifásico utilizado, segundo Mathworks(2020c), é uma combinação de três transformadores monofásicos lineares. O tipo de ligação selecionado foi delta-y aterrado.

O transformador proposto é utilizado para simular uma conexão do sistema elétrico de potência e a máquina síncrona.

4.2.4 Modelo da máquina síncrona

A máquina síncrona, que já foi descrita na seção 2.3, é uma peça importante na composição do esquema proposto, pois o comportamento dela é o principal parâmetro do estudo. A máquina utilizada no modelo na proposição de simulação está disponível no Simulink, sendo representado pela Figura 22. As configurações do transformador estão disponíveis na Tabela 1.

Figura 22. Bloco da máquina síncrona do Simulink utilizado no modelo proposto.



Fonte: Mathworks (2020f).

O modelo da máquina síncrona da Figura 22 tem como parâmetros de entradas e saídas os elementos que estão presentes na Tabela 5. Alguns parâmetros são utilizados como dados de realimentação dos blocos de regulador de tensão (RT) e regulador de velocidade (RV). Além de outros sendo utilizados como parte importante do estudo presente.

Tabela 5. Entradas e saídas do bloco de máquina síncrona do Simulink.

Entradas e saídas da Máquina Síncrona		
Grandeza	Unidade de Medida	Descrição
Pm	pu	Potência mecânica no eixo da máquina

Vf1	pu	Tensão de campo
m	-	Vetor contendo sinais de medição
A	pu	Sinal elétrico da fase A
B	pu	Sinal elétrico da fase B
C	pu	Sinal elétrico da fase C

Fonte: Elaboração própria (2020).

O vetor m é um vetor de dados importantes na simulação, pois, nele está contido os valores referentes à máquina síncrona. Sendo os parâmetros que podem ser acessados nesse vetor disponíveis na Tabela 6.

Tabela 6. Tabela de dados do vetor m.

Dados do Vetor m		
Grandeza	Unidade de Medida	Descrição
ias	pu	Corrente a do estator
ibs	pu	Corrente b do estator
ics	pu	Corrente c do estator
iq	pu	Corrente de eixo em quadratura do estator
id	pu	Corrente de eixo direto do estator
ifd	pu	Corrente de campo
ikq1	pu	Corrente de enrolamento amortecedor de eixo em quadratura
ikq2	pu	Corrente de enrolamento amortecedor de eixo em quadratura
ikd	pu	Corrente de enrolamento amortecedor de eixo direto
phimq	pu	Fluxo mútuo de eixo em quadratura
phimd	pu	Fluxo mútuo de eixo direto
vq	pu	Tensão do estator de eixo em quadratura
vd	pu	Tensão do estator de eixo direto
lmq	pu	Indutância de saturação de eixo em quadratura
lmd	pu	Indutância de saturação de eixo direto
dtheta	rad	Variação do ângulo do rotor

w	pu	Velocidade do rotor
Pe	pu	Potência elétrica
dw	pu	Variação de velocidade do rotor
theta	graus (°)	Ângulo do rotor
Te	pu	Torque eletromagnético
delta	graus (°)	Ângulo de carga
Pe0	pu	Potência ativa de saída
Qe0	pu	Potência reativa de saída

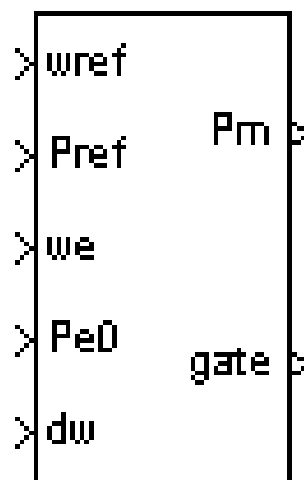
Fonte: adaptado de Mathworks (2020f).

Segundo Mathworks (2020f) a modelagem da máquina síncrona utilizada foi baseada em um exemplo utilizado por Kundur (1994). Essa modelagem pode ser observada na seção 2.3.

4.2.5 Modelo do RV

O regulador de velocidade, conforme já descrito na seção 2.3.1, é um item responsável por manter a frequência nominal e o balanço de potência ativa no sistema. O regulador de velocidade (RV) utilizado no modelo proposto está disponível no Simulink, sendo representado pela Figura 23. As configurações do RV estão disponíveis na Tabela 2.

Figura 23. Bloco de RV do Simulink utilizado no modelo proposto.



Fonte: Mathworks (2020b).

O modelo de RV utilizado tem como parâmetros de entradas e saídas os elementos apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Entradas e saídas do RV

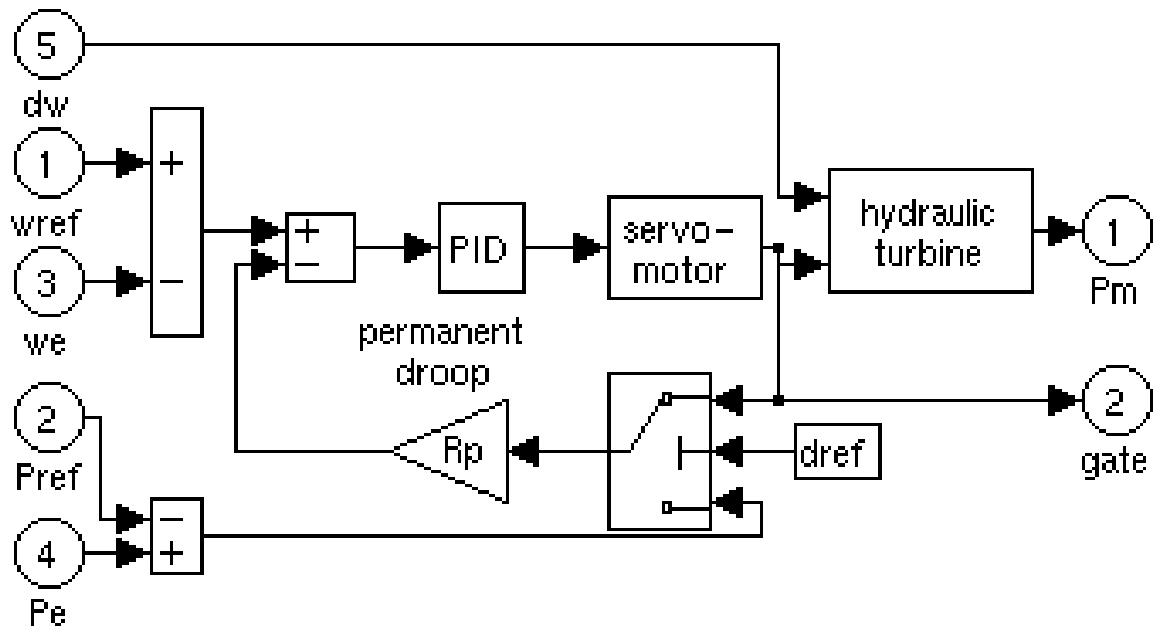
Entradas e saídas do RV		
Grandeza	Unidade de Medida	Descrição
wref	pu	Velocidade angular de referência
Pref	pu	Potência de referência
we	pu	Velocidade real da máquina
Pe0	pu	Potência elétrica real da máquina
dw	pu	Variação da velocidade angular
Pm	pu	Potência mecânica, utilizada como entrada na máquina síncrona
gate	pu	Abertura do distribuidor

Fonte: Elaboração própria (2020).

Os elementos de entrada e saída do regulador de velocidade (RV) da Tabela 7 estão configurados de modo que a w_{ref} se mantenha com a referência de 1 pu, assim como a P_{ref} . Entretanto, w_e , P_{e0} e d_w são dados realimentados pela saída da máquina síncrona. Referente às saídas, o gate não é utilizado e a P_m é a potência mecânica de saída de referência do RV. Esta informação é utilizada como entrada na máquina síncrona.

Além dos elementos de entrada e saída da Tabela 7, o RV possui internamente um sistema de controle PID – Proporcional-Integral-Derivativo, para o controle do modelo de servo-motor e de turbina hidráulica como disposta na Figura 24.

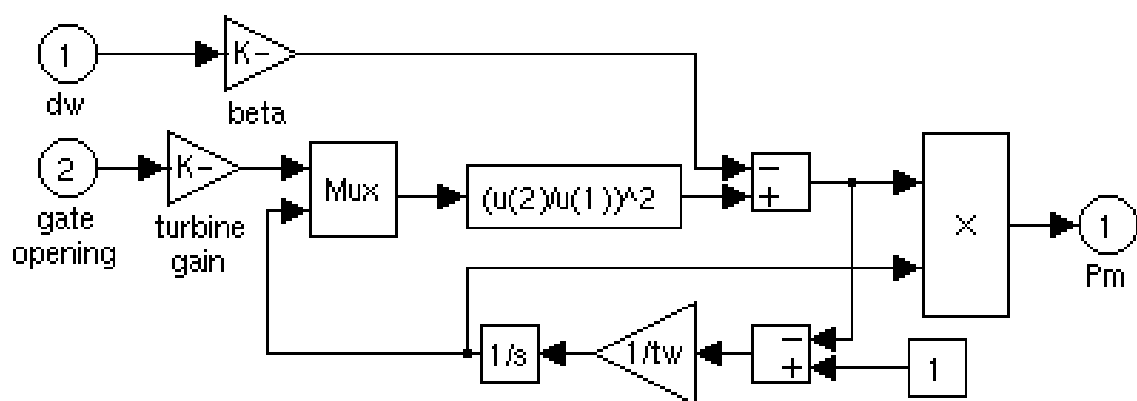
Figura 24. Diagrama de blocos do bloco do RV.



Fonte: Mathworks (2020b).

O modelo interno do bloco da turbina hidráulica está representado na Figura 25, sendo este um modelo representativo de uma turbina genérica.

Figura 25. Diagrama de blocos da turbina hidráulica.

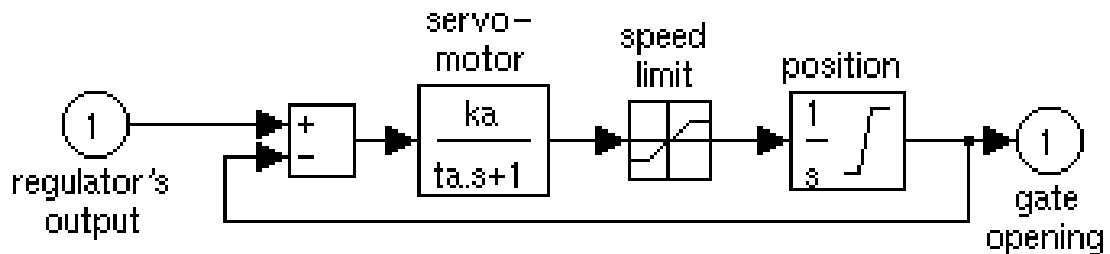


Fonte: Mathworks (2020b).

Assim como a turbina hidráulica, o servo-motor também possui sua modelagem por meio de diagrama de blocos, como pode ser observado na Figura 26.

O servo motor é o responsável pela movimentação da turbina hidráulica. Ele realiza a movimentação das pás ou pistão da turbina.

Figura 26. Diagrama de blocos do servo-motor.



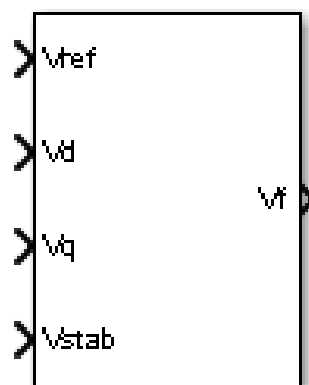
Fonte: Mathworks (2020b).

Com isso, o modelo de regulador de velocidade (RV) do Simulink, pode representar o funcionamento desse equipamento e suas malhas de controle.

4.2.6 Modelo do RT

O regulador de tensão (RT) é o elemento de controle da máquina síncrona, na qual é responsável principalmente pelo controle da tensão terminal e da potência reativa gerada. O regulador escolhido para ser utilizado no modelo proposto está disponível no Simulink, sendo representado pela Figura 27. Seus parâmetros de configurações estão disponíveis na Tabela 3.

Figura 27. Bloco do RT do Simulink utilizado no modelo proposto.



Fonte: Mathworks (2020a).

O modelo de regulador de tensão (RT) utilizado tem como parâmetros de entradas e saídas os elementos apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Entradas e saídas do RT

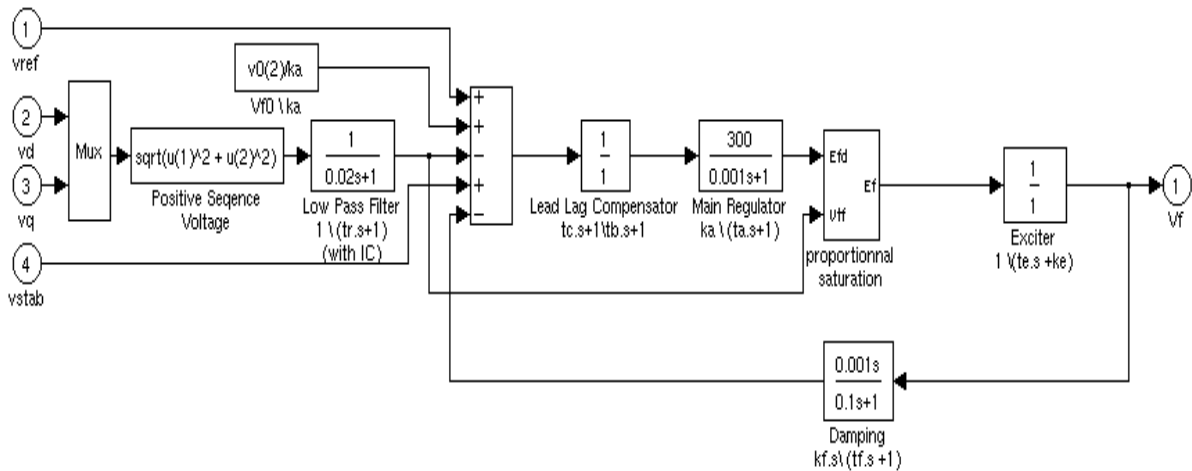
Entradas e saídas do RT		
Grandeza	Unidade de Medida	Descrição
Vref	pu	Tensão de referência
Vd	pu	Tensão de eixo direto da tensão terminal
Vq	pu	Tensão de eixo em quadratura da tensão terminal
Vstab	pu	Tensão de estabilização do PSS
Vf	pu	Tensão de campo, utilizada como entrada na máquina síncrona

Fonte: Elaboração própria (2020).

Os elementos de entrada e saída do RT da Tabela 8 estão configurados de modo que a V_{ref} se mantenha com a referência de 1 pu. Entretanto, V_d , V_q e V_{stab} são dados realimentados pela saída da máquina síncrona. Referente à saída, a V_f é a tensão de campo de saída de referência do RT, sendo que esta informação é utilizada como entrada na máquina síncrona.

Além dos elementos de entrada e saída da Tabela 8, o regulador de tensão (RT) possui internamente um sistema de controle baseado no modelo ST1C da IEEE (2016). Entretanto, esse modelo interno não utiliza nenhum dos limitadores citados na seção 2.3.2.1, como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28. Diagrama de blocos do RT.



Fonte: Mathworks (2020a).

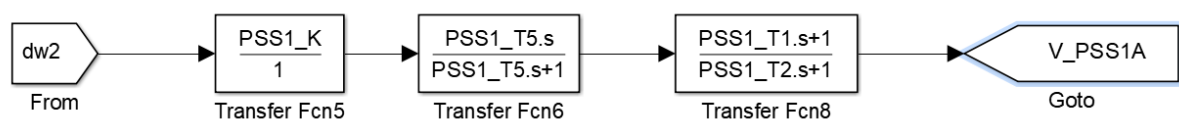
Com isso, o modelo de RT do Simulink pode representar o funcionamento desse equipamento e algumas de suas malhas de controle, sendo que uma parte do seu controle é advindo do PSS apresentado na seção 4.2.7.

4.2.7 Modelo do PSS

Diferente dos demais modelos apresentados na seção 4.1, o modelo do *power system stabilizer* (PSS) foi criado a partir de blocos de funções de transferência, simplificando o modelo PSS1A presente na norma da IEEE (2016). Esta trata de modelos específicos para controladores de reguladores de tensão e modelos de PSS.

O modelo utilizado na simulação pode ser visto na Figura 29 e a configuração utilizada já foi apresentada na Tabela 4. Nesse modelo estão presentes elementos do PSS já discutidos no capítulo 3, sendo eles o ganho, o washout e o compensador de fase.

Figura 29. Modelo de PSS utilizado na Simulação.



Fonte: Elaboração própria (2020).

O modelo de *power system stabilizer* (PSS) proposto tem como entrada a variação de velocidade do rotor (d_{w2}) e como saída a tensão que deve ser inserida no regulador de tensão (RT) para obter uma estabilização adicional das oscilações do sistema.

Nesse modelo não foi utilizado o bloco do filtro de passa baixa, pois, o sistema elétrico simulado não possui sinais de alta frequência, já que ele permanece no estado estacionário até que haja uma perturbação.

Apresentada todos os modelos de dispositivos utilizados no modelo proposto, serão apresentadas as simulações realizadas com o intuito de demonstrar a vantagem da utilização desses modelos.

4.3 Simulações Realizadas

Com os modelos individuais devidamente apresentados, foram realizadas simulações, a fim de verificar a eficácia do modelo e do PSS. As três simulações apresentadas nas seções 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3, foram elaboradas utilizando duas vezes o sistema da Figura 18 com as mesmas configurações. Entretanto, uma está utilizando a saída do PSS conectada na entrada V_{stab} do RT e a outra configuração sem V_{stab} no RT.

Deste modo é possível diferenciar o comportamento do sistema proposto com e sem a utilização do PSS em sua composição. Sendo assim, tornando possível a análise dos efeitos provenientes desse sistema de controle do RT. Foi verificado nesses dois sistemas a variação da potência ativa de saída, da velocidade angular, que é diretamente ligada a frequência, e da saída de tensão. Todos esses valores serão apresentados em pu e visualizados graficamente. Com isso, possibilitando um melhor entendimento do comportamento do sistema com as perturbações impostas.

4.3.1 Degrau de 20% de Tensão de campo

A primeira perturbação imposta no sistema proposto é o de grau de 20% tensão de campo. Pra esse item segundo Cançado (2010) “cabe destacar que o

degrau de tensão contém frequências associadas tanto do ponto de vista dos surtos rápidos, quanto dos surtos oscilatórios”.

O degrau de tensão é um ensaio válido, visto que pode ser solicitado o aumento de tensão pelo regulador do sistema, a fim de o sistema ter um suprimento de potência reativa ou uma elevação de tensão no barramento.

Para tanto, foi efetuado um degrau de tensão de 20% acima e depois retirado. Foi realizado a inserção de um degrau na V_{ref} , ou seja, V_{ref} terá o valor de 1,2 pu. O degrau é inserido com 4 segundos de simulação e com 8 segundos de simulação esse degrau é retirado. Pode-se verificar que a reação do sistema com e sem a inclusão do *power system stabilizer* (PSS) no regulador de tensão (RT).

4.3.2 Degrau de 20% de Potência

Foi realizado um outro ensaio, que seria o degrau de potência. Através dessa proposição de degrau, pode-se analisar a reação da máquina ao ser solicitada uma mudança brusca de potência ativa gerada ou uma possível obstrução do conduto forçado.

O ensaio realizado para verificar a reação do sistema foi dois degraus de potência. O primeiro foi adicionando 0,2 pu na referência de potência do RV aos 4 segundos de duração da simulação. O segundo retirando 0,2 pu na referência de potência do RV novamente em 8 segundos. Essa análise foi realizada da mesma forma que foi feito na seção 4.3.1.

4.3.3 Variação de demanda

A variação na carga foi o terceiro ensaio realizado. Este foi baseado na simulação de uma variação de demanda relevante, sendo dobrada no ponto em conexão. É importante observar que o barramento infinito irá suprir a potência necessária que o sistema necessita.

Apesar de haver a presença do barramento infinito, haverá oscilação. Isso é devido à uma inserção de carga repentina que tende a reduzir a frequência do sistema. Enquanto os reguladores não ajustam a saída a fim de suprir a demanda, o

gerador tem um torque acelerante no seu eixo. Neste caso, ocorre uma redução da velocidade angular da máquina síncrona.

Assim como nos ensaios de degrau de tensão e potência, a inserção da demanda é um ensaio relevante a fim de demonstrar a eficácia do algoritmo PSS quando sujeito a essas perturbações. Os ensaios realizados para verificar a reação do sistema foram a inserção e a retirada de demanda do sistema. No primeiro, a demanda modificada foi de 200 MW e a perturbação foi inserida em 4 segundos. No segundo ensaio retirou-se a carga em 8 segundos.

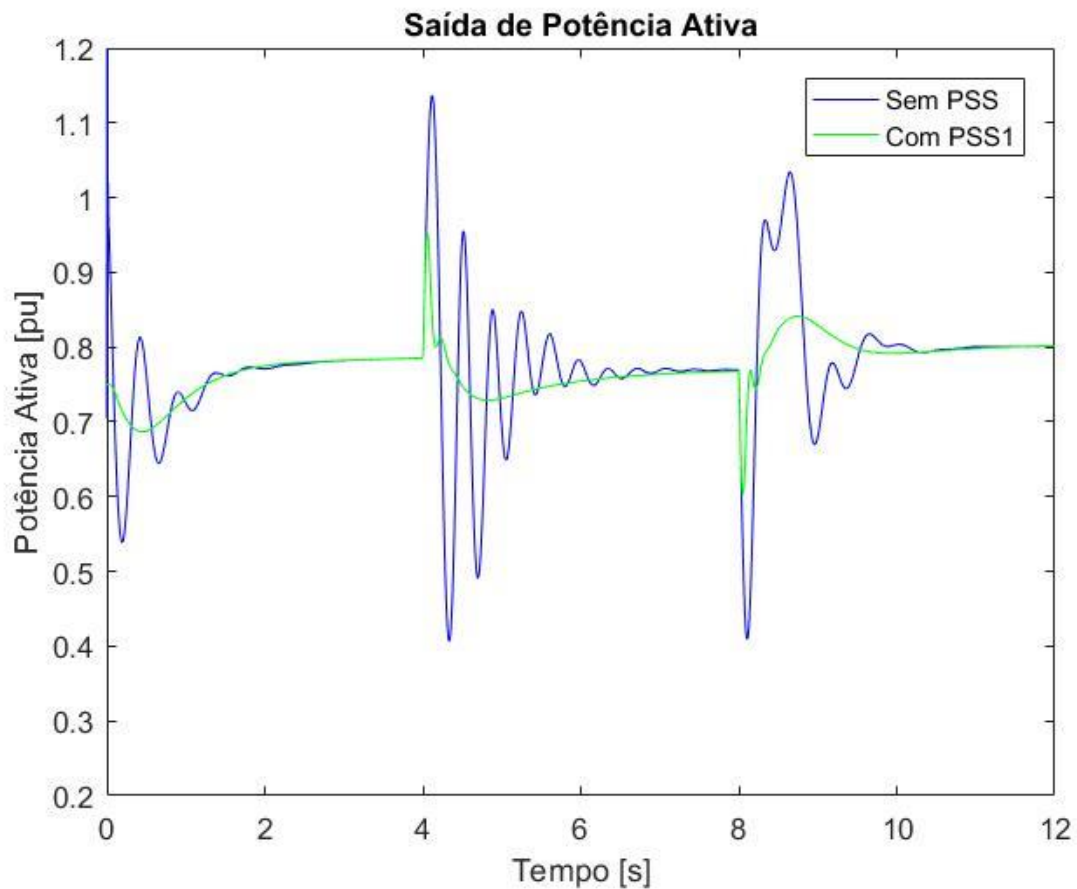
Após todas as realizações das simulações, com todos os parâmetros ajustados os resultados obtidos são mostrados e discutidos na seção 4.4. Esses resultados são considerando a inserção das perturbações.

4.4 Resultados Obtidos

Nesse capítulo serão discutidos os resultados obtidos em cada simulação descrita na seção 4.3. É analisado o comportamento da potência ativa, da velocidade angular, que é diretamente ligada a frequência do sistema, e da tensão terminal. Através disso é possível verificar se a inserção do *power system stabilizer* (PSS) no sistema proposto, que acarretou uma melhora do mesmo. Isso já foi observado nos casos expostos no capítulo 3.

O primeiro ensaio realizado foi o degrau de tensão, onde pode ser observado o comportamento da potência ao longo do tempo, na Figura 30. O comportamento da velocidade angular é apresentado na Figura 31 e o comportamento da tensão na Figura 32.

Figura 30. Saída de potência ativa da simulação com degrau de tensão.



Fonte: Elaboração própria (2020).

Na Figura 30 é observado através do gráfico da potência ativa, em pu, ao longo do tempo, em segundos, o comportamento do sistema sem PSS e com PSS. As curvas estão com as cores azul para o sistema sem PSS e verde para o sistema com PSS.

No início da simulação pode ser observado um momento de instabilidade, com a inserção de uma pequena oscilação de conexão da máquina a rede. Nessa oscilação a atuação do PSS faz com que o gerador tenha uma menor oscilação de potência. Isso demonstra a efetividade do controlador em amortecer a variação da potência.

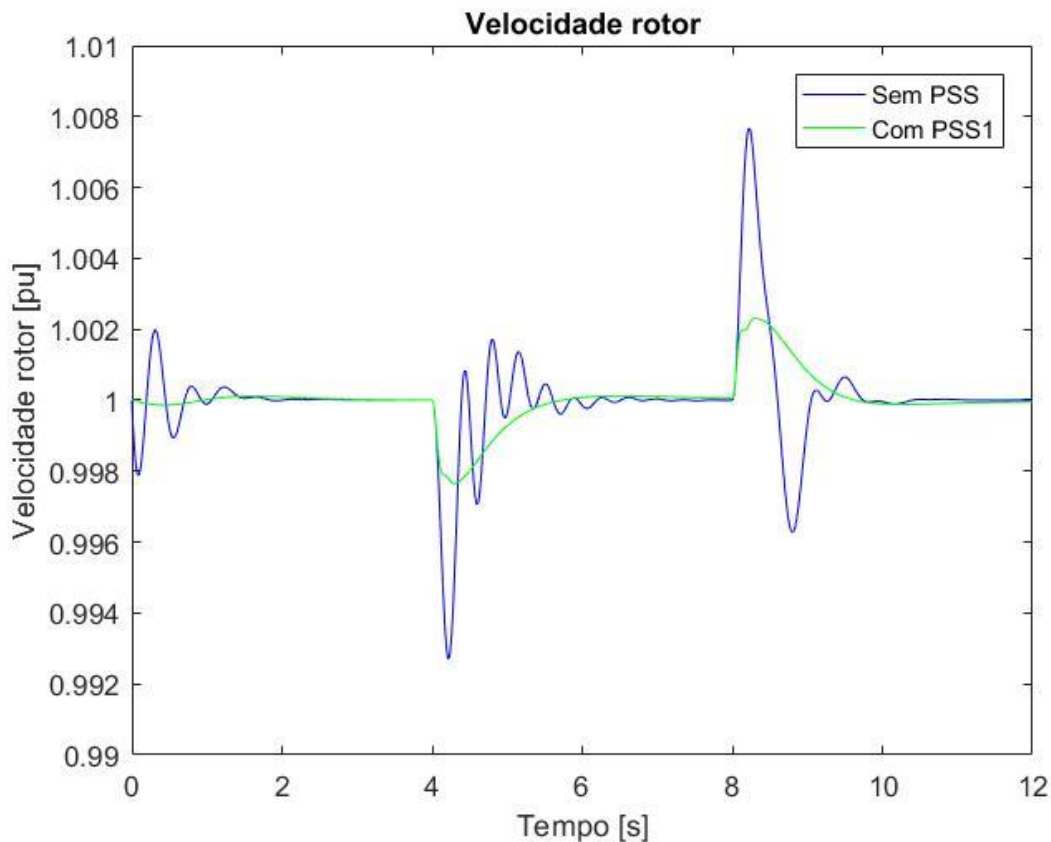
Quando a simulação chega em 4 segundos, após a curva estabilizar, é inserido um degrau positivo de tensão de 20% na referência do RT. Isso ocasiona uma instabilidade na potência. Com a inserção do PSS é perceptível a redução de

aproximadamente 50% do pico de oscilação de potência e seu tempo de estabilização da potência diminui em aproximadamente 60%, ou de 2,2 segundos para 1 segundo.

Assim como no degrau de tensão positivo, ao ser adicionado no gerador um degrau de tensão negativo de 20%, o gerador tem uma reação semelhante ao degrau positivo. Nesse caso ele possui uma redução de 50% no vale de tensão. Contudo, o tempo necessário para o gerador retornar ao regime permanente é um pouco maior que no momento do degrau de tensão positivo.

Na Figura 31 é demonstrado o gráfico da velocidade do rotor, que é diretamente ligada à variação da frequência sendo apresentada em pu no eixo das ordenadas. O tempo é apresentado no eixo das abscissas em segundos. Também pode ser visto no gráfico o comportamento do sistema sem *power system stabilizer* (PSS) e com PSS, nas curvas de cores azul e verde respectivamente.

Figura 31. Velocidade do rotor da simulação com degrau de tensão.



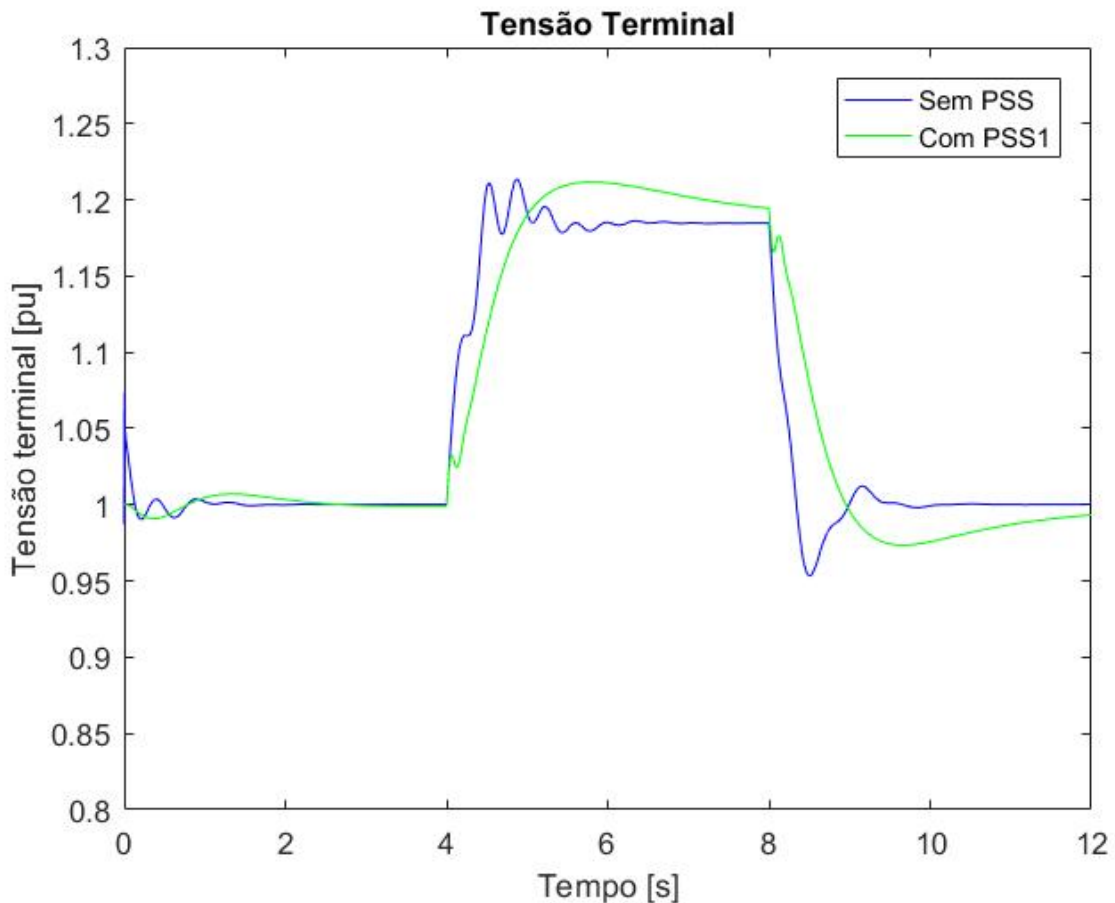
Fonte: Elaboração própria (2020).

A Figura 31 traz a resposta de que a atuação do *power system stabilizer* (PSS) deixa praticamente desprezível a oscilação inicial da velocidade do rotor da

máquina. O PSS reduziu o vale e o pico, ao inserir os degraus positivos e negativo de tensão em aproximadamente 70%, além de possuir uma curva mais suave, sem muitas oscilações, o que é benéfico para o sistema. Entretanto diferente da potência, não é notada uma grande diferença no tempo de retorno ao regime permanente na velocidade do rotor.

O terceiro aspecto a ser analisado na primeira simulação é a tensão terminal, que assim como na potência ativa e na velocidade do rotor é exibida em relação ao tempo, em segundos. As simulações com e sem PSS podem ser observadas na Figura 32 com as cores azul e verde respectivamente.

Figura 32. Saída de tensão terminal da simulação com degrau de tensão.



Fonte: Elaboração própria (2020).

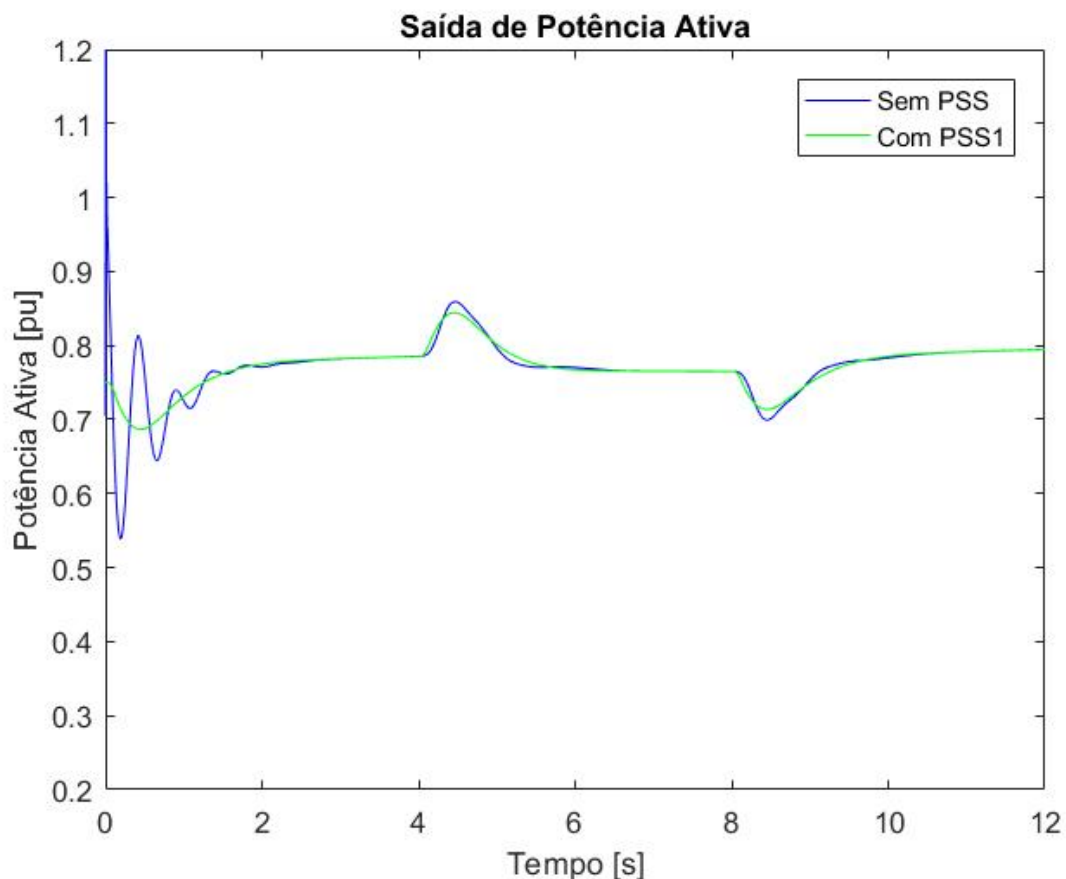
A tensão terminal, na Figura 32, se mostra mais lenta com a atuação do *power system stabilizer* (PSS). Os picos e vales estão próximos nas duas curvas, no

entretanto, a modificação da curva da tensão terminal é uma consequência da inserção do PSS no sistema.

As respostas obtidas nas simulações fazem com que possa se considerar um resultado satisfatório do PSS com a inserção do degrau de tensão negativo e positivo. A inserção do PSS melhora o aspecto geral do sistema quando inserido um degrau de tensão. Houve uma suavização das curvas e redução das oscilações de potência e velocidade do rotor, causando uma leve modificação da curva da tensão terminal, mostrando assim a eficácia do PSS nesse tipo de perturbação do sistema.

O segundo ensaio realizado foi o degrau de potência, onde o comportamento resultante da potência ao longo do tempo é mostrado na Figura 33. A velocidade angular é vista na Figura 34 e a tensão na Figura 35.

Figura 33. Saída de potência ativa da simulação com degrau de potência.



Fonte: Elaboração própria (2020).

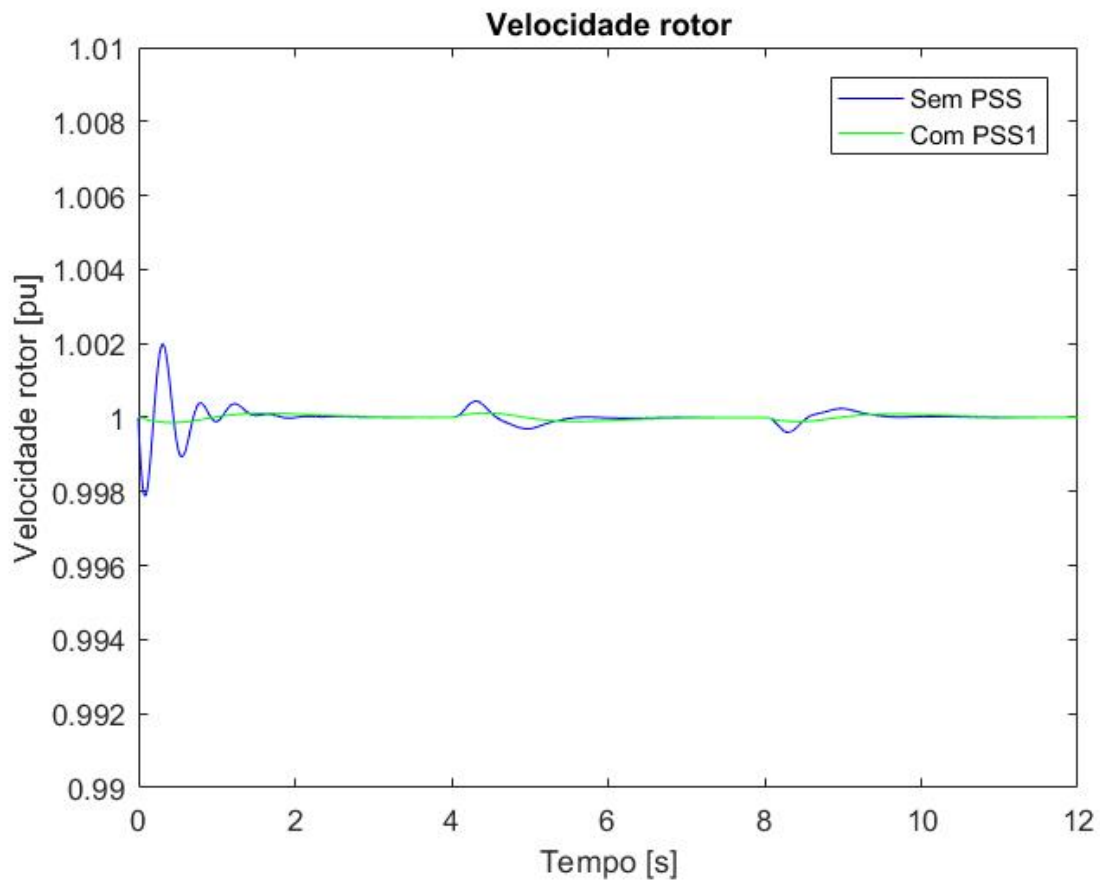
Na Figura 33 pode ser observado o gráfico da potência ativa, em pu, no tempo, em segundos, com o comportamento do sistema sem *power system stabilizer* (PSS) e com PSS. As curvas estão nas cores azul e verde, respectivamente.

Assim como na simulação do degrau de tensão, no início da simulação pode ser observado um momento de instabilidade, simulando uma pequena oscilação de conexão da máquina a rede.

Em 4 segundos, após a curva estabilizar, é inserido um degrau negativo de potência de 20% na referência do RV, ocasionando uma pequena instabilidade na potência. A atuação do PSS, neste caso, é pequena pois a variação foi realizada na entrada do RV, mesmo assim houve uma pequena redução do pico de potência no momento do degrau e seu tempo de estabilização da potência foi levemente alongado. Assim como no degrau de potência negativo, ao ser adicionado no gerador um degrau de potência positivo de 20%, o gerador tem uma reação semelhante ao degrau negativo.

Na Figura 34 é demonstrado o gráfico da velocidade do rotor, que é diretamente ligada à variação da frequência, sendo apresentada em pu no eixo das ordenadas e o tempo no eixo das abcissas em segundos. Também pode ser observado no gráfico o comportamento do sistema sem PSS e com PSS, nas curvas de cores azul e verde, respectivamente.

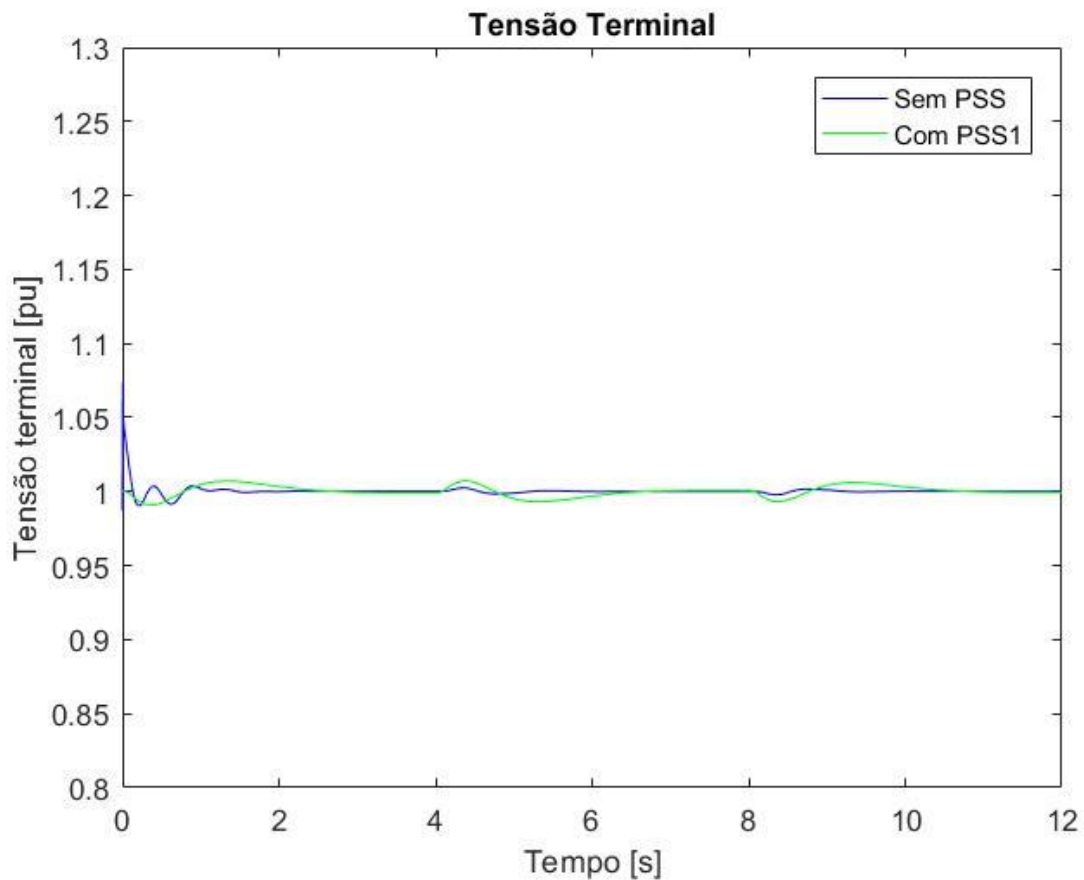
Figura 34. Velocidade do rotor da simulação com degrau de potência.



Fonte: Elaboração própria (2020).

Na Figura 34 pode é visto que o comportamento da velocidade do rotor se mantém praticamente constante com e sem o *power system stabilizer* (PSS), salvo em alguns momentos que possui uma pequena variação. Assim como no ensaio anterior, o terceiro aspecto a ser analisado na segunda simulação é a tensão terminal. A potência ativa e a velocidade do rotor são exibidas em relação ao tempo, em segundos. As simulações com e sem PSS podem ser observadas na Figura 35 com as cores azul e verde, respectivamente.

Figura 35. Saída de tensão terminal da simulação com degrau de potência.

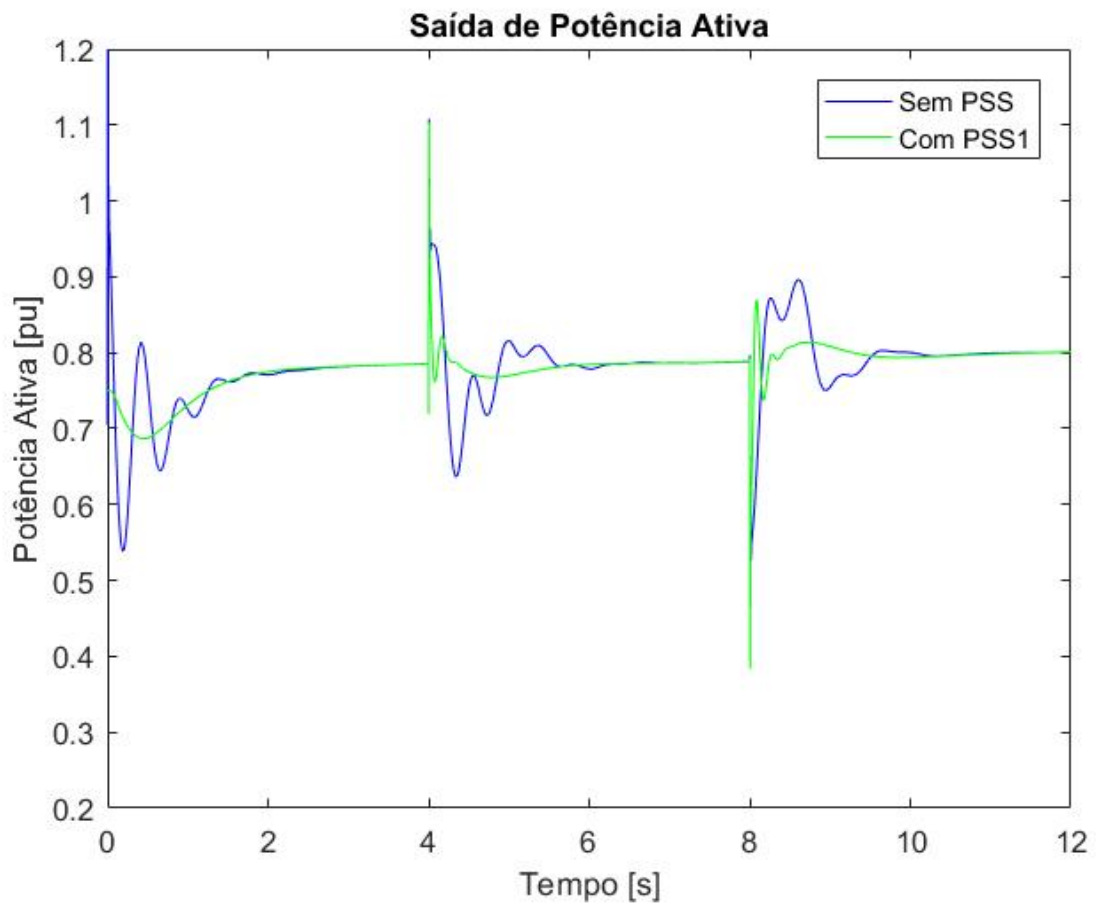


Fonte: Elaboração própria (2020).

Na Figura 35 é possível observar que há uma variação maior da tensão terminal, no momento dos degraus de potência. Tal variação é realizada pelo *power system stabilizer* (PSS) para melhorar as curvas de potência ativa e de velocidade do rotor. Nos degraus de potência teve uma pequena oscilação, mas houve uma melhora no sistema. Mantendo a frequência constante, com uma pequena oscilação na tensão terminal como resultado.

O terceiro e último ensaio realizado foi a simulação da variação da demanda, onde pode ser observado o comportamento da potência ao longo do tempo na Figura 36. A velocidade angular é apresentada na Figura 37 e a tensão na Figura 38.

Figura 36. Saída de potência ativa da simulação com aumento da demanda.



Fonte: Elaboração própria (2020).

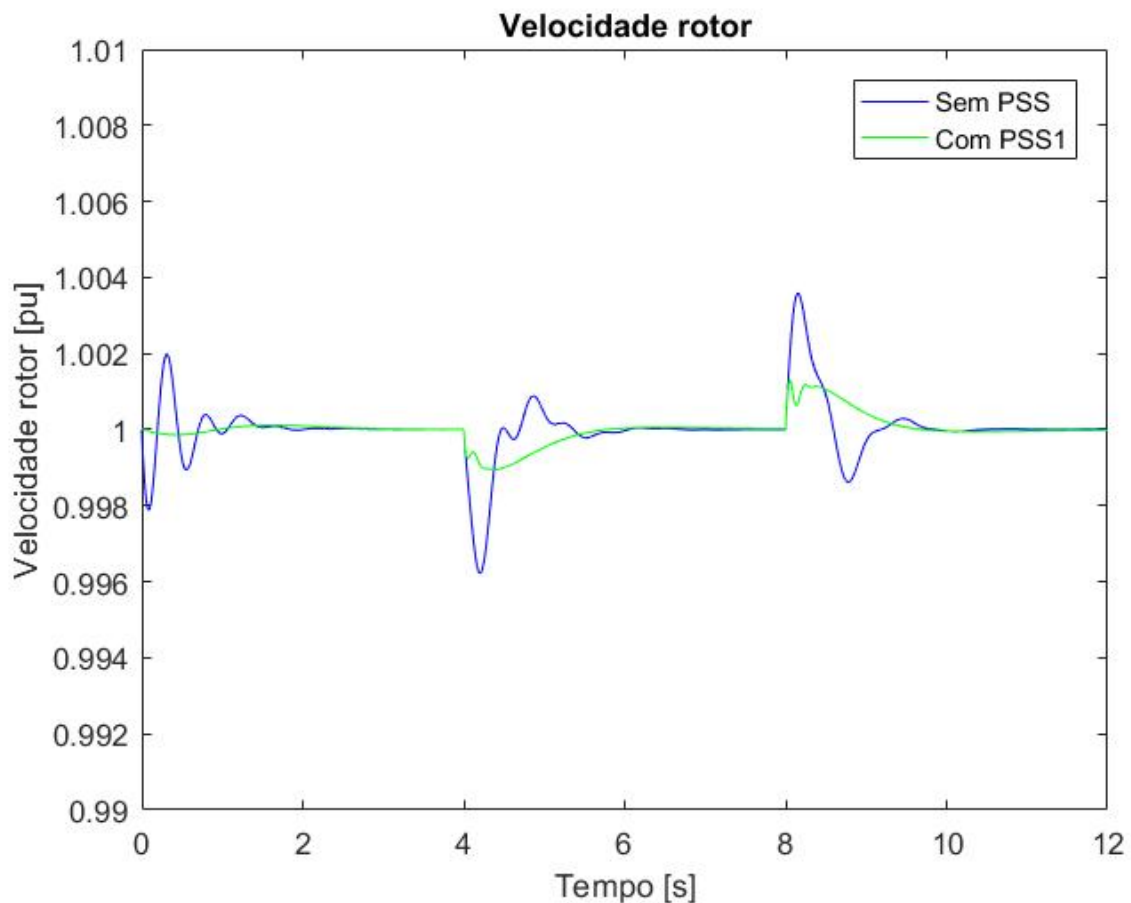
Na Figura 36 pode ser observado o gráfico da potência ativa, em pu, ao longo do tempo, em segundos. O comportamento do sistema é mostrado sem e com *power system stabilizer* (PSS), nas curvas com cores azul e verde, respectivamente.

Assim como nos ensaios anteriores, no início da simulação pode ser observado um momento de instabilidade, simulando uma pequena oscilação de conexão da máquina a rede. Em 4 segundos, após a curva estabilizar, é inserida uma demanda D2 de 200 MW no lado de alta tensão do transformador, dobrando a potência consumida pela demanda instantaneamente e causando uma perturbação no sistema. Nessa simulação, a inserção do PSS não acarretou redução considerável do pico de potência. Entretanto, seu tempo de estabilização da potência diminuiu em aproximadamente 80%, entrando no estado de regime permanente rapidamente.

Assim como na inserção de D2 no sistema, com a retirada dele, o gerador tem uma reação semelhante à inserção. Houve uma redução do tempo necessário para o gerador retornar ao regime permanente em aproximadamente 80%. Porém, o vale é um pouco maior que no momento da inserção da carga.

Na Figura 37 é demonstrado o gráfico da velocidade do rotor, que é diretamente ligada à variação da frequência sendo apresentada em pu no eixo das ordenadas e o tempo no eixo das abcissas em segundos. Também pode ser observado no gráfico dessa figura o comportamento do sistema sem e com *power system stabilizer* (PSS), nas curvas de cores azul e verde, respectivamente.

Figura 37. Velocidade do rotor da simulação com aumento da demanda.



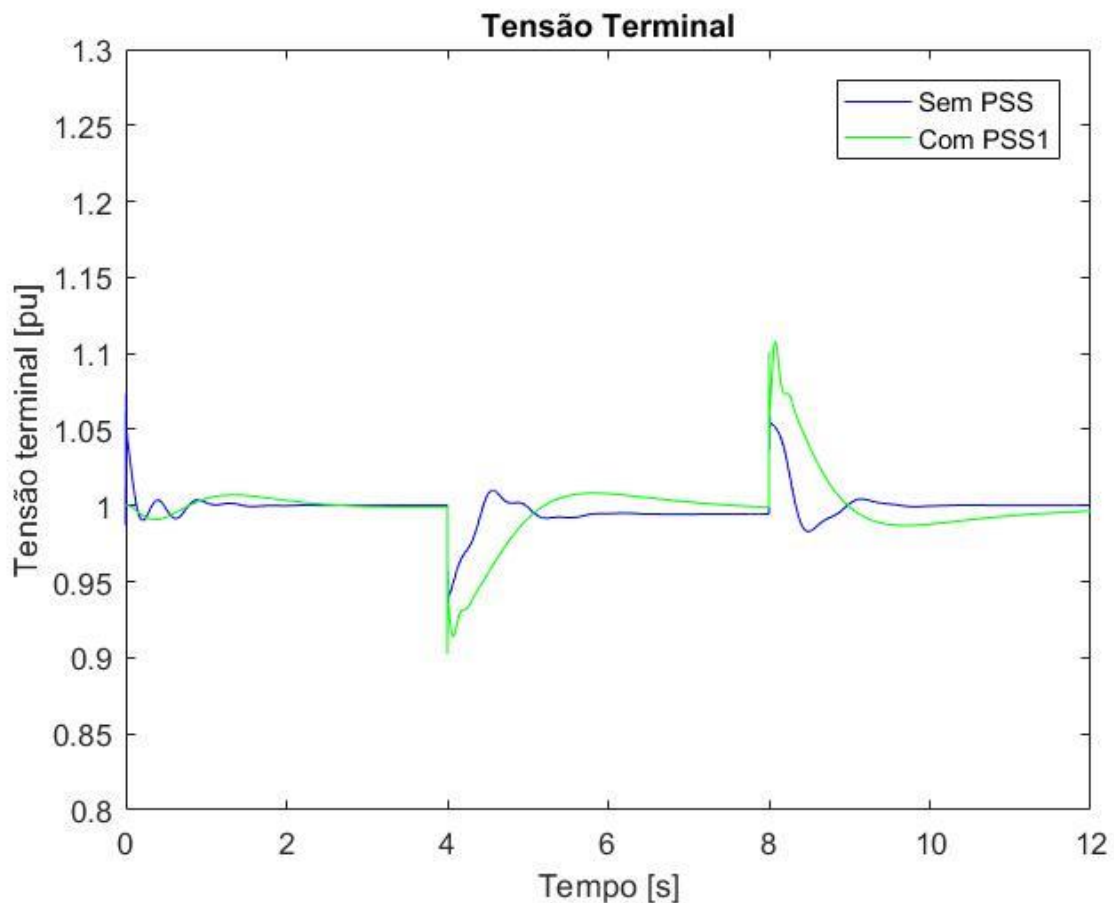
Fonte: Elaboração própria (2020).

Na Figura 37 é visto que a atuação do *power system stabilizer* (PSS) deixa desprezível a oscilação inicial da velocidade do rotor da máquina. O PSS reduziu o

vale e o pico, ao inserir e retirar a demanda, em aproximadamente 70%, além de possuir uma curva mais suave, sem muitas oscilações. Tal situação é benéfica para o sistema. Entretanto, diferente da potência não é notada uma grande diferença no tempo de retorno ao regime permanente na velocidade do rotor entre a simulação com e sem PSS.

O terceiro aspecto a ser analisado na terceira simulação é a tensão terminal. Esse gráfico é, assim como os demais, em relação ao tempo, em segundos. As simulações com e sem PSS podem ser observadas na Figura 38 com as cores azul e verde, respectivamente.

Figura 38. Saída de tensão terminal da simulação com aumento da demanda.



Fonte: Elaboração própria (2020).

Nos resultados é possível identificar que a tensão terminal, mostrado na Figura 38, é mais lenta com a atuação do *power system stabilizer* (PSS). O pico e o

vale estão aproximadamente 30% maior com a inserção do PSS. Entretanto, a modificação curva da tensão terminal é uma consequência da atuação do PSS no sistema. Com a inserção do degrau de tensão negativo e degrau de tensão positivo, houve uma melhora significativa no aspecto geral do sistema, pode-se considerar um resultado satisfatório do PSS. Houve a suavização das curvas e redução das oscilações de potência e de velocidade do rotor. É identificado uma modificação da curva da tensão terminal devido à utilização da tensão para controlar o estatismo da máquina, o que ratifica a eficácia do PSS nesse tipo de perturbação do sistema.

Através desses cenários pode-se considerar um resultado satisfatório do PSS, melhorando o aspecto geral do sistema quando realizado um degrau de tensão, um degrau de potência e a variação da demanda.

5 CONCLUSÃO

A implementação de um sistema elétrico de potência, que contou com uma barra infinita, duas demandas, um transformador e um gerador controlado por um RT e um RV, visou verificar o comportamento do sistema ao incluir no controle do gerador o *power system stabilizer* (PSS). Através do auxílio do software Matlab/Simulink foi possível analisar o comportamento da potência ativa e frequência, por meio da velocidade do rotor, e da tensão terminal da máquina síncrona. Para isso foram realizadas três simulações distintas, onde se analisou a resposta do gerador frente a diferentes parâmetros ao receber uma perturbação no sistema.

As perturbações realizadas no sistema foram um degrau de tensão, um degrau de potência e uma alteração da demanda. Foram realizadas essas três perturbações em dois sistemas elétricos que eram distintos apenas pela inserção do PSS no regulador de tensão (RT). Com essas simulações foi possível observar os efeitos da atuação do PSS em perturbações no sistema.

Os resultados obtidos nas três simulações, ao qual o PSS está inserido, são considerados satisfatórios. Foi possível observar uma grande diferença na saída de potência ativa e na variação da demanda. O sistema volta ao estado de regime permanente rapidamente, em comparação com o modelo sem a inserção do PSS. No ensaio com o degrau de potência é notório a melhora no sistema, porém com uma eficiência menor do que nos demais ensaios. Nos três ensaios pode ser observado que há uma variação na tensão terminal, causado pela utilização do PSS. Entretanto, o PSS deixa o sistema mais estável mesmo com a pequena perturbação causada na tensão terminal. Através dos resultados obtidos nas simulações realizadas o PSS se mostra uma parte importante do RT. Ele auxilia na atenuação das oscilações do sistema ao ser inserida uma perturbação, mantendo a estabilidade e reduzindo as oscilações prejudiciais ao sistema. Vale salientar que o aumento da tensão terminal, como no caso da variação da demanda, com a atuação do PSS pode ser prejudicial ao sistema. Para amenizar isso, pode ser adicionado no PSS o bloco limitador de sinal que irá limitar a atuação do PSS, evitando assim, que a possível atuação de sistemas de proteção de sobretensão.

Apesar dos resultados satisfatórios constatados ainda é possível visar trabalhos futuros relacionados. Uma possibilidade é a verificação do comportamento

do PSS em um sistema isolado com mais de um gerador. Outra possibilidade é utilizar outras configurações de PSS, recomendadas pela IEEE (2016) e disponíveis na norma IEEE 421.5-2016, além de ser possível a comparação de eficácia de modelos. Uma terceira possibilidade é avaliar a criação de um software para a otimização máxima de todos os parâmetros de regulador de velocidade (RV), regulador de tensão (RT) e *power system stabilizer* (PSS). Este último possivelmente será abordado apenas em pós graduação devido ao nível de complexidade.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Brasil alcança 170 mil megawatts de capacidade instalada em 2019.** Disponível. em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao>. Acesso em: 14 set. 2020.

ARAUJO, Thiago da C. **Análise de máquina síncrona de polos salientes sólidos.** 42 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de elétrica) – Curso de Engenharia elétrica. Escola Politécnica. UFRJ. Rio de Janeiro. 2018.

BARBOSA, Fernando M. **Estabilidade de sistemas elétricos de energia.** apostila do curso de Engenharia elétrica. FEUP. Universidade do Porto. 2013.

CAIQIN, Sun; CHENGQIU, Li; CHENGJUN, Shi. Simulation and implementation of marine generator excitation system with PSS. **2009 International Conference on Mechatronics and Automation.** DOI: 10.1109/ICMA.2009.5246266. Changchun. Ago. 2009.

CANÇADO, Álvaro B. **Um estudo dos modelos de máquinas elétricas submetidos a surtos de tensão,** 138 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – PPGEE. UFMG. Minas Gerais. 2010.

DULAU, Lucian I.; ABRUDEAN, Mihail. Simulation of a Power System with Renewable Energy Sources Considering Load Profiles **IEEE International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES).** DOI: 10.1109/EMES.2015.7158405. Oradea. jun. 2015.

FARIA, Danilo M. de. **Regulação de Tensão de um Gerador Síncrono Através da Linearização por Realimentação de Estados.** 61 f. Monografia (Graduação em Engenharia de energia) – FGA. UnB. Brasília. 2014.

FERNANDES, Pablo C. **Regulador Automático de Tensão: Influência do Ganho no Sistema Elétrico de Potência.** 86f. Dissertação de mestrado (Mestre em Ciências em engenharia elétrica – Sistemas elétricos de potência) – Departamento de engenharia elétrica. Universidade federal de Itajubá. Itajubá. 2011.

GARCIA, Welinton. B. **Simulação e análise de transitórios eletromecânicos utilizando controladores clássico e fuzzy**. 54 f. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de energia) – Departamento de engenharia de energia. UFSC. Araranguá. 2018.

GU, Wenyan. Commissioning Generator AVR, PSS and Model Validation. **IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**. Halifax. DOI: 10.1109/CCECE.2015.7129354. Mai. 2015.

IEEE. **421.5-2016 - IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies**, 26 ago. 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7553421>. Acesso em: 02 set. 2020.

KAHOULI, Amor; GUESMI, Tawfik; ABDALLAH, Hsan H.; OUALI, Abderrazak. A genetic algorithm PSS and AVR controller for electrical power system stability. **2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices**. Djerba. DOI: 6. 10.1109/SSD.2009.4956736. mar. 2009.

KUNDUR, Prabha; BALU, Neal J.; LAUBY, Mark G. **Power system stability and control**. New York: McGraw-hill. 1994.

MATHWORKS. **Help center: Excitation System**. Provide excitation system for synchronous machine and regulate its terminal voltage in generating mode. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/>. Acesso em: 05 set. 2020a.

MATHWORKS. **Help center: Hydraulic Turbine and Governor**. Model hydraulic turbine and proportional-integral-derivative (PID) governor system. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/>. Acesso em: 04 set. 2020b.

MATHWORKS. **Help center: Three-Phase Transformer (Two Windings)**. Implement three-phase transformer with configurable winding connections. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/>. Acesso em: 02 set. 2020c.

MATHWORKS. **Help center: Three-Phase Series RLC Load**. Implement three-phase series RLC load with selectable connection. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/>. Acesso em: 01 set. 2020d.

MATHWORKS. **Help center: Three-Phase Source.** Implement three-phase source with internal R-L impedance. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/>. Acesso em: 03 set. 2020e.

MATHWORKS. **Help center: Synchronous Machine.** Model the dynamics of three-phase round-rotor or salient-pole synchronous machine. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/>. Acesso em: 06 set. 2020f.

MOHANDÉS, Baraa; ABDELMAGID, Youssef L.; BOIKO, Igor. A genetic algorithm PSS and AVR controller for electrical power system stability. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems vol.100**. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.041. Djerba. set. 2018.

POSSATTI, Luiz H. F. de. **Identificação de parâmetros de máquinas síncronas utilizando dados operacionais.** 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – Programa de engenharia elétrica. COPPE. UFRJ. Rio de Janeiro. 2013.

PUPIN, Carlos E. **Estudo da Estabilidade a Pequenas Perturbações de Sistemas Elétricos Multimáquinas com Dispositivos FACTS do Tipo SSSC e Controladores Suplementares (POD e PSS).** 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – FEIS. UNESP. Ilha solteira. 2009.

SAKRAN, Felipe F. **Análise de influência dos parâmetros do PSS nos modos eletromecânicos em um sistema elétrico de potência.** 64f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de elétrica com ênfase em sistemas de energia e automação) – EESC. UPS. São Carlos. 2018.

SANTOS, Marcel S. **Modelagem dinâmica de turbinas hidráulicas axiais de dupla regulação para estudos de estabilidade angular transitória em sistemas elétricos de potência.** Universidade Federal da Itajubá. Itajubá. 2012.

SIQUEIRA, Vinicius. **Análise da Estabilidade Dinâmica em sistemas elétricos por meio de interface gráfica.** 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia elétrica) – FGA. UnB. Brasília. 2016.

SOARES, João M.; PONS, Fernando H.; Arioni, Alvaro D. Estabilizadores de Sistema de potência derivados da potência acelerante: experiência no sistema colombiano. **XIII**

SNPTEE Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica. Florianópolis. Jul. 1995.

SOARES, João M.; ZENI, Nelson Jr. Power System Stabilizers for Hydrogenerators: Analysis, Comparison and Field Implementation. **IFAC Proceedings Volumes.** Rio de Janeiro. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)60472-5. Jul. 1985.

SOUZA, Lucas E. de. **Modelagem, identificação e validação de atuadores eletromecânicos de unidades geradoras de usinas hidrelétricas.** 73f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de elétrica) – Departamento de engenharia elétrica. CTC. Campus Teixeira de Freitas. UFSC. Florianópolis. 2020.

YAMASHITA, Marcos S. **AVALIAÇÃO DA SINTONIA DAS MALHAS DE CONTROLE DOS REGULADORES DE VELOCIDADE E POTÊNCIA ATIVA DE UMA USINA HIDRELÉTRICA UTILIZANDO MODELO COMPUTACIONAL E SIMULAÇÃO.** 106f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de elétrica) – Departamento de engenharia elétrica. UNISUL. Tubarão. 2020.

ZOGRAFOS, Dimitrios; GHANDHARI, Mehrdad; ERIKSSON, Robert. Power system inertia estimation: utilization of frequency and voltage response after a disturbance. **Elsevier Electric Power System Research.** V. 161, DOI: 10.1016/j.epsr.2018.04.008, ago. 2018.